



UCA

Universidad
de Cádiz

Universidad de

Cádiz

Escuela Superior de Ingeniería

I Jornadas Predoctorales de la ESI

3 y 4 de Diciembre 2009



Libro de Actas



**I Jornadas Predoctorales de la
Escuela Superior de Ingeniería**

Libro de Actas



Cádiz, 3 y 4 de Diciembre de 2009

Editores: Arturo Morgado Estévez
Inmaculada Medina Bulo

Imprime: Copistería San Rafael
C/ Benjumeda, 36
11003-Cádiz

ISBN-13: 978-84-608-0981-4

COMITÉ CIENTÍFICO

Francisco Aguayo González
Javier Botana Pedemonte
Juan José Domínguez Jiménez
Juan Fernández Peña
Diego Gómez Vela
Rafael González Palma
Ricardo Hernández Molina
Manuel Jesús López Sánchez

Inmaculada Medina Bulo
Mariano Marcos Bárcena
Arturo Morgado Estévez
Andrés Pastor Fernández
Manuel Sánchez Carrilero
Higinio Sánchez Sainz
Antonio Tomeu Hardasmal

EDICIÓN TÉCNICA

Álvaro Gómez Parra
Moisés Batista Ponce

Jorge Salguero Gómez
Miguel Álvarez Alcón

ORGANIZA



Escuela Superior de Ingeniería
Universidad de Cádiz

INDICE

I Jornadas Predoctorales de la ESI

Algunos aspectos de la prueba de Software basada en mutaciones para composiciones de Servicios Web <i>M.C. de Castro Cabrera, I. Medina Bulo</i>	1
Análisis de la documentación internacional sobre metrología eléctrica <i>M. Pérez-Braza, M.A. Sebastián Pérez, M. Marcos Bárcena</i>	5
Análisis del Proceso de Fresado de Materiales Compuestos de Fibra de Carbono con Matriz Epoxy <i>A.J. Gómez López, M. Marcos Bárcena</i>	7
Aspectos de la simulación numérica del proceso de conformado de la chapa de aleación de aluminio de uso aeronáutico <i>M. Tornell Barbosa, M. Sánchez Carrilero, M.A. Sebastián Pérez</i>	9
Autómatas Celulares Difusos en Criptografía <i>F.J. Navarro Ríos, A.J. Tomeu Hardasmal</i>	13
Caracterización de Instalaciones Fotovoltaicas Mediante Técnicas de Termografía Infrarroja <i>G. Álvarez Tey, J. Carpio Ibáñez, R. Jiménez Castañeda</i>	17
Consideraciones sobre la evaluación de la temperatura en procesos de mecanizado <i>C. García López, M. Marcos Bárcena</i>	23
Detección de Prefallos en Componentes del Tren de Potencia en Generadores de Energía Eléctrica a Partir de Energía Eólica <i>J. Díaz García, J.R. Sáenz Ruíz, H. Sánchez Sainz</i>	27
Estabilización de sistemas hipercaóticos en órbitas periódicas inestables <i>M. Prian Rodríguez, M.J. López Sánchez</i>	31
Estudio de la Evolución del Desgaste de Herramientas en el Fresado Periférico de Alta Velocidad de la Aleación UNS A92024-T3 <i>J. Salguero Gómez, M. Marcos Bárcena</i>	35
Estudio del efecto de la vibración producida por el movimiento de las campanas de la Catedral de Cádiz <i>J.J. González-Outón Coca, M. Salvá Cárdenas</i>	39
Estudio del efecto microlente mediante simulación de patrones de magnificación y análisis estadístico de la concentración de cáusticas <i>T. Mediavilla Gradolph, O. Ariza Sánchez, E. Mediavilla Gradolph</i>	43
Estudio del Torneado en Seco de la aleación Ti-6Al-4V a partir de la Inspección SOM de la Herramienta y la Viruta obtenida <i>J. Gerez Miras, M. Marcos Bárcena</i>	47
Fabricación Lean y Conformado de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Termoestable <i>J. Raposo Barrada, M. Marcos Bárcena</i>	51

Identificación y recuperación de textos paralelos en la web <i>E. Yryroz Díaz de Liano, A. Tomeu Hardasmal</i>	55
Influencia de las sordinas en la respuesta en frecuencia del violín <i>J.M. Cuevas Romero, M.A. Salv Cárdenas</i>	59
Influencia de los Parámetros de la Soldadura GSFCAW Multipasada en el Valor del Ensayo de CTOD de un Acero Microaleado de Alto Límite Elástico <i>J.M. Portela Nnez, R.E. González Palma, J.M. González Madrigal</i>	63
Influencia del material de la herramienta en el rendimiento del mecanizado de las aleaciones de Titanio <i>M.A. Castillo Jiménez, M. Márcos Bárcena</i>	67
Influencia del Mecanizado en la Integridad Superficial de Aleaciones de Ti. Estudio preliminar basado en desviaciones de forma <i>M. Huerta Gómez de Merodio, M. Márcos Bárcena, E.M. Rubio Alvir</i>	73
Introducción al estudio de la influencia del proceso de mecanizado en la corrosión de aleaciones de aluminio <i>R. Bienvenido Bárcena, M. Marcos Bárcena</i>	77
Introducción al estudio del efecto de las vibraciones en el acabado superficial de piezas mecanizadas <i>F. Fernández Ancio, M. Marcos Bárcenas, A.J. Gmez López</i>	81
La Eficiencia Energética como Catalizador de la Productividad de la Industria de Fabricación <i>S. Rondn de La Rosa, M. Marcos Bárcena, M.A. Sebastián Pérez</i>	89
Mejora del Rendimiento del Mecanizado en Aleaciones de Aluminio de Elementos Aeronáuticos Sometidos a Corrosión <i>A. Gmez Parra, M. Marcos Bárcena</i>	93
Metodología para la prueba de caja blanca en WS-BPEL basada en mutaciones y generación dinámica de invariantes <i>M. Palomo Duarte, I. Medina Bulo</i>	97
Modelo de gestión de la Calidad para el Tratamiento de Material No Conforme detectado en procesos Industriales <i>J.M. Cantillo Sánchez, M. Marcos Bárcena</i>	101
Modelo Holónico de Sistemas de Calidad Aplicación a Empresa Extendida <i>J. R. Lama Ruiz, M. Sánchez Carrilero, F. Aguayo González</i>	105
Primeros Avances en una Metodología Orientada a Modelos para los Sistemas de Información de Empresas de Fabricación Distribuida <i>A. García Domínguez, I. Medina Bulo, M. Marcos Bárcena</i>	109
Problemática en el Taladrado de Materiales Compuestos CFRP <i>M. lvarez Alcón, M. Sánchez Carrilero, M. Marcos Bárcena</i>	113
Procedimiento de obtención de casos de prueba de calidad para composiciones WS-BPEL <i>A. Estero Botaro, I. Medina Bulo</i>	117
Propuesta metodológica para el estudio de los elementos de desgaste por adhesión secundaria de herramientas de corte <i>M. Batista Ponce, M. Marcos Bárcena</i>	121

Propuesta Metodológica para la Caracterización Metrológica del Taladrado de Materiales Compuestos de uso Estratégico en la Industria Aeronáutica <i>J. E. Garófano López, M. Marcos Bárcena</i>	125
Una aproximación al estudio de la influencia del proceso de mecanizado en la corrosión bajo tensión de la aleación UNS A92024 <i>J.E. Díaz Vázquez, M. Marcos Bárcena, F.J. Botana Pedemonte</i>	129

I Jornadas Predoctorales

DE LA

ESI

Escuela Superior
de Ingeniería

Algunos aspectos de la prueba de Software basada en mutaciones para composiciones de Servicios Web

M. C. de Castro Cabrera⁽¹⁾, I. Medina Buló⁽²⁾

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Cádiz
Escuela Superior de Ingeniería. C/ Chile, 1, 11003 - Cádiz.

⁽¹⁾Tlf: 956015292; email: maricarmen.decastro@uca.es

⁽²⁾ Tlf: 956015780; email: immaculada.medina@uca.es

Resumen

En el marco de las pruebas de software basadas en generación de mutantes aplicadas a servicios web, se hace necesario disponer de un amplio conjunto de casos de prueba que cubran la detección de, sino todos, la gran parte de los diferentes programas mutados obtenidos a partir del programa original a probar. También se hace necesario disponer de un conjunto efectivo de operadores de mutación y de un gran abanico de composiciones de servicios web. Además, sería también necesario hacer un estudio comparativo de las diversas técnicas y herramientas existentes actualmente. En este documento se presentan las distintas líneas de trabajo en las que sería necesario invertir un mayor esfuerzo para conseguir avanzar en este tipo de pruebas de software.

1. Introducción

Tomando como base la importancia de la verificación y prueba del software que existe actualmente, así como las nuevas aplicaciones, hace que esta disciplina tenga un gran impacto social y económico. A las empresas cada vez se les exige mayor calidad en sus procesos y en sus productos, y entre ellas las empresas de software. Además hoy en día, no se concibe ninguna empresa, sea de lo que sea que no utilice software para su gestión y funcionamiento. Por estas razones, es evidente que es necesario trabajo en esta área.

Por otro lado, el auge que están experimentando recientemente las aplicaciones basadas en servicios web hace que la prueba de este tipo de software esté teniendo un gran interés. En concreto, existen diferentes técnicas para realizar esta verificación del software [1-3]. De entre ellas, vamos a centrarnos en las pruebas de software basadas en mutaciones para composición de servicios web, en WS-BPEL. Aquí se nos plantean varias alternativas de posibles trabajos presentes y futuros, que se citan a continuación y se desarrollarán en el resto del documento.

1. En primer lugar, podemos, utilizar una técnica ya existente y en desarrollo con buenos resultados como son las pruebas de software basadas en mutaciones seleccionadas mediante algoritmos genéticos (utilizada para

implementar la herramienta GAmEra) [4] que se ha aplicado a composiciones de servicios web en WS-BPEL. La opción sería aplicar esta técnica y construir otra herramienta que la utilice pero basada en otro lenguaje de programación (por ejemplo Java), por lo que habría que adaptarse a las particularidades de dicho lenguaje.

2. Otra posible línea de trabajo que nos planteamos es apoyar y desarrollar mejoras en GAmEra y en las técnicas utilizadas en su desarrollo. En este sentido podemos considerar varias posibilidades no excluyentes:
 - a) Análisis de los casos de pruebas existentes para mejorarlos y generar nuevos casos.
 - b) Análisis de las composiciones de servicios web existentes, para mejorarlas y conseguir nuevas composiciones más reales, ya sea utilizando las que estén disponibles en la web, o bien, implementando nuevas composiciones.
 - c) Diseñar nuevas técnicas para la obtención de casos de prueba de calidad, y llevar a cabo su implementación.
 - d) Realizar una comparativa entre las técnicas y herramientas existentes y las que estamos desarrollando.

- e) Implementar nuevos operadores de mutación para WS-BPEL que cubran determinados criterios de cobertura.
- f) La extensión de GAmEra que usa mutaciones de primer orden (first order mutation, FOM) a mutaciones de orden superior (high order mutation, HOM).

2. Pruebas basadas en mutaciones: herramientas y técnicas para Java

Para trabajar en la primera opción propuesta anteriormente, se ha realizado una búsqueda bibliográfica incidiendo en los trabajos relacionados con el lenguaje Java. A este respecto existen varias herramientas y técnicas software disponibles. Una de las herramientas llamada MuJava [5,6] se basa en un sistema para la generación automática de mutantes en dicho lenguaje. Además existen trabajos relacionados con este lenguaje que se centran en aspectos particulares como son la concurrencia [7] y el paradigma orientado a objetos [8,9].

Al valorar los trabajos ya realizados con este lenguaje, y sus características, observamos que, por un lado, hay numerosas técnicas y herramientas basadas en prueba de software para este lenguaje, y por otro lado, nos aleja de la perspectiva de los servicios web. Este último campo de estudio nos parece más atractivo y con más demanda social.

3. Pruebas de software para composiciones WS-BPEL

Vamos a desarrollar la segunda línea de trabajo propuesta, describiendo cada una de las posibilidades.

a) La primera posibilidad nos lleva a analizar los casos de prueba existentes utilizados en las herramientas GAmEra y Takuan [10] para composiciones de servicios Web en WS-BPEL [11]. Estos casos de prueba, se encuentran en archivos con formato *BPTS* (BPEL Test Suit). Siguen un esquema de diseño e implementación propuesto por [12] en su Tesis de Master.

Para especificar, diseñar e implementar los casos de prueba utilizamos una biblioteca de pruebas unitarias llamada BPELUnit, que es una extensión para BPEL de la familia de herramientas xUnit [13].

Para la especificación de las pruebas la manera más sencilla de integrar los datos de prueba, interacciones e información del despliegue de un conjunto de casos de prueba es, utilizar un formato basado en XML, un fichero cuya extensión es *.bpts*. Estos documentos se validan con un XML-Esquema.

En la figura 1 se muestra el formato del documento del conjunto de casos de pruebas.

La primera parte se corresponde con la sección de despliegue, llamada *deployment section*, ya que contiene la información para el despliegue de la unidad bajo prueba (process under test, PUT) y especificación de los *partners* (agentes, clientes y servicios que participan en la composición) que van a ser simulados.

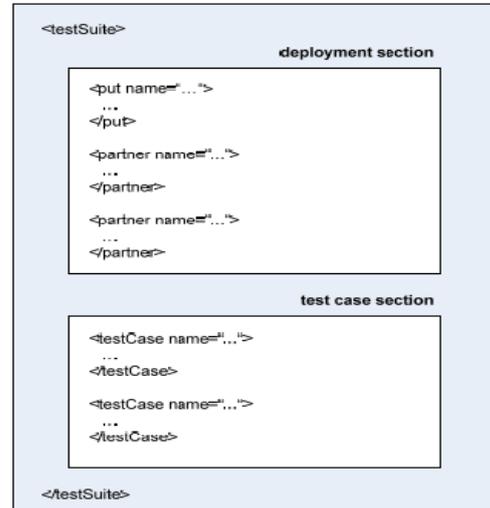


Figura 1. Documento de la especificación del conjunto de casos de pruebas.

La segunda parte es la sección del caso de prueba (*test case section*), que contiene un número arbitrario de casos de prueba secuenciados que contienen las pistas del cliente y el partner (*client and partner track*) con actividades.

El elemento raíz XML conjunto de casos pruebas, contiene dos elementos adicionales:

- Nombre del conjunto de pruebas
- URL base

como se muestra en la figura 2 para un ejemplo de la composición de servicios de una agencia de viajes.

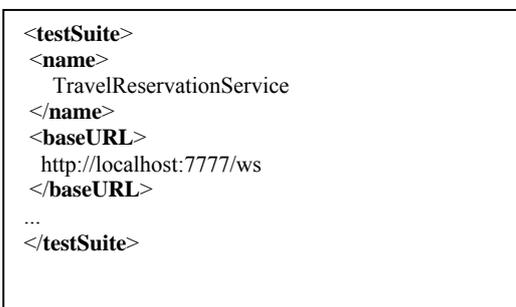


Figura 2. Especificación del conjunto de pruebas para la agencia de viajes

La sección de despliegue describe los datos y todos los partners de la unidad bajo prueba que va a ser simulada en este entorno de trabajo. La especificación de PUT debe contener, al menos:

- Un nombre
- Un tipo
- Un archivo XML

Vemos esta sección en la figura 3, referente al ejemplo anterior:

```

<tes:deployment>
  <tes:put name="TravelReservationService"
    type="activebpel">

    <tes:wSDL>TravelReservationService.wsdl
    </tes:wSDL>
    <tes:property

name="BPRFile">travel.bpr</tes:property>
  </tes:put>

  <tes:partner name="Airline"
wSDL="AirlineReservationService.wsdl"/>
  <tes:partner name="Hotel"
    wSDL="HotelReservationService.wsdl"/>
  <tes:partner name="Vehicle"
    wSDL="VehicleReservationService.wsdl"/>
</tes:deployment>

```

Figura 3. Especificación de la sección de despliegue para la composición de la agencia de viajes

Además esta sección puede contener la especificación de los *partners* de PUT. Cada *partner* se especifica con:

- Un nombre
- Un fichero WSDL

Se pueden observar estas descripciones de *partners* en la figura 3.

En cuanto a la sección de casos de pruebas contiene el actual caso de prueba de un conjunto de pruebas. Cada caso de prueba se encuadra en un elemento XML y contiene una pista del cliente (*client track*) y un número de pistas de los *partners* (*partner tracks*). Como se puede ver en la figura 4 que contiene un fragmento de un caso de prueba para la composición de servicios anterior.

```

/tes:testCase>
<tes:testCase name="OnlyVehicleCancelled"
  basedOn="OnlyVehicle" abstract="false"
  vary="false">
  <tes:clientTrack/>
  <tes:partnerTrack name="Hotel"/>
  <tes:partnerTrack name="Airline"/>
  <tes:partnerTrack name="Vehicle">
  <tes:receiveOnly
    service="ves:VehicleReservationSoapService"
    port="VehicleReservationSoapHttpPort"
    operation="reserveVehicle">
    <tes:receive fault="false"/>
  </tes:receiveOnly>
  .....
  </tes:partnerTrack>
</tes:testCase>

```

Figura 4. Especificación de un caso de prueba .

b) Entre las composiciones de servicios web que se han utilizado para comprobar las herramientas GAmEra y TakuAn están: el servicio de préstamos (Loan Approval), el servicio de agencia de viajes (Travel Reservation Service), la metabúsqueda (Metasearch) y el servicio de bolsa (Market Place) que están en WS-BPEL 2.0. Además, también se está trabajando en una composición de servicios real basada en la librería virtual Amazon, que actualmente está en WS-BPEL 1.1 y se trata de adaptarla a la versión 2.0 para poderla también utilizar empleando las técnicas y herramientas desarrolladas.

c) En cuanto al diseño de nuevas técnicas para obtener pruebas de calidad, se han hecho algunos avances. En concreto se ha diseñado una arquitectura [14] para generación de casos de prueba de composiciones WS-BPEL basada en mutaciones y algoritmos genéticos, como ampliación del sistema GAmEra inicial. Es decir, se ha dotado a la herramienta de un nuevo componente que automatiza el proceso de generación de casos de pruebas y consigue obtener un conjunto de casos de prueba mejorado, a partir del conjunto inicial.

d) Realización de una comparativa entre las técnicas y herramientas existentes: Mothra [15] para Fortran (es el más conocido), MuJava para Java (mencionado anteriormente), Proteum [16] para C (implementa todos los operadores de mutación diseñados para el lenguaje de programación ANSI C), MiLU [17] para C (realiza pruebas de mutación FOM y HOM) y SQLMutation [18] para consultas de bases de datos escritas en SQL .

e) Actualmente hay definidos 26 operadores de mutación para el lenguaje WS-BPEL [19], que permiten modelar los fallos más frecuentes que pueden cometer los programadores cuando escriben programas en este lenguaje. Se pretende aumentar el número de operadores de mutación con otros nuevos que consideren algunos criterios de cobertura.

f) Por último, también sería posible abordar la extensión de GAmEra que usa mutaciones de primer orden (first order mutation, FOM) a mutaciones de orden superior (high order mutation, HOM).

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado varias líneas en las que se está trabajando y varias propuestas futuras, encaminadas al diseño e implementación de nuevas técnicas y herramientas para pruebas de software basadas en mutaciones. Partiendo del análisis del conjunto de casos de prueba actuales se ve necesario ampliarlos y mejorar la calidad de los ya existentes. En la misma línea es preciso encontrar nuevas composiciones de servicios reales o bien, desarrollarlas. Además se han propuesto mejoras de las técnicas y herramientas que actualmente están desarrolladas y en funcionamiento para poder obtener mejores resultados en mayor número de casos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Programa Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia y fondos FEDER mediante el proyecto SOAQSim (TIN2007-67843-C06-04).

6. Referencias

- [1] B. Beizer, *Software Testing Techniques* International Thomson Computer Press, 2ª edición, 1990
- [2] G.J Myers, C. Sandler, T. Badgett, T. M. Thomas, *The Art of Software Testing*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] B. Beizer, *Black-Box Testing: Techniques for Functional Testing of Software and Systems*. John Wiley & Sons, 1995
- [4] Grupo SPI&FM: Web oficial de GAmEra. <http://neptuno.uca.es/~gamera>.
- [5] Web oficial de la herramienta de generación de mutantes para Java. <http://cs.gmu.edu/~offutt/mujava/> (2008)
- [6] Y. Ma, J. Offutt, K.R. Kwon, *MuJava : An automated class mutation system*, Journal of Software Testing, Verification and Reliability, 2005.
- [7] J.S. Bradbury, Cordy, J.R. Dingel, *Mutation Operators for Concurrent Java (J2SE 5.0)*. Noviembre 2006.
- [8] Y. Ma, J. Offutt, *Description of Class Mutation Operators for Java*. Noviembre 2005.
- [9] Y. Ma, J. Offutt, *Description of Method-level Mutation Operators for Java*. Noviembre 2005.
- [10] Grupo SPI&FM: Web oficial de Takuan. <http://neptuno.uca.es/~takan>.
- [11] OASIS: Web services business process execution language 2.0. <http://docs.oasisopen.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html> (2007).
- [12] P. Mayer, *Design and Implementation of a Framework for Testing BPEL compositions, Masterarbeit*. Hannover, 11 September 2006.
- [13] P. Mayer, Lübke, D., *Towards a BPEL unit testing framework*. En: TAV-WEB'06: Proceedings of the 2006 workshop on Testing, analysis, and verification of webservices and applications, ACM (2006) 33–42.
- [14] A. Estero Botaro, J.J. Domínguez Jiménez, I. Medina Bulo, *Una arquitectura para la generación de casos de prueba de composiciones WSBPEL basada en mutaciones*, PRIS, 2009 IV Taller sobre pruebas en Ingeniería del Software, Septiembre 2009.
- [15] K.N.King, A.J. Offutt. *A FORTRAN language system for mutation-based software testing*. *Software - Practice and Experience* 21(7) (1991) 685–718
- [16] M. Delamaro, J. Maldonado. *Proteum—a tool for the assessment of test adequacy for C programs*. En: Proceedings of the Conference on Performability in Computing System (PCS 96), (1996) 79–95,
- [17] Y. Jia, M. Harman, MILU: *A customizable, run-time optimized higher order mutation testing tool for the full C language*, en TAIC-PART'08: Proceedings of the Testing: Academic and Industrial Conference-Practice and Research Techniques, IEEE computer Society, 2008, pp.94-98.
- [18] J.Tuya, M. J. S. Cabal, C. de la Riva.: *Mutating database queries*. *Information and Software Technology* 49(4) (2007) 398–417.
- [19] A. Estero, F. Palomo, I. Medina. *Operadores de mutación para WS-BPEL 2.0*. Actas de las Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos, Vol. 2, No. 4, 2008.

Análisis de la documentación internacional sobre metrología eléctrica

M. Pérez-Braza⁽¹⁾, M.A. Sebastian Pérez⁽²⁾, M. Marcos Bárcena⁽³⁾

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería Eléctrica (UCA), C/ Chile, 1 - 11002 Cádiz, 956015140, maximo.perez@uca.es

⁽²⁾ Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación (UNED), C/ Juan del Rosal, 12 - 28040 Madrid, 913986458, msebastian@ind.uned.es

⁽³⁾ Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial (UCA), C/ Chile, 1 - 11002 Cádiz, 956015142, mariano.marcos@uca.es

Resumen

La mayoría de la documentación existente actualmente sobre la metrología (guías, manuales, procedimientos, normativas, ...) se encuentra disponible en ficheros electrónicos con formato PDF. En el Proyecto de Tesis Doctoral se propone realizar un estudio comparativo de la normativa internacional en metrología eléctrica, tanto inter como intranivel, y realizar, para la gestión eficaz de la documentación, un sistema de consulta de la información que permita: un fácil acceso y consulta de la documentación, realizar actualizaciones de la información y posteriores modificaciones, ejecutar búsquedas de palabras o cadenas de texto en los ficheros, ...

1. Introducción

En los últimos años, las entidades y asociaciones nacionales e internacionales relacionadas con la Metrología han dedicado un esfuerzo especial a la preparación de toda la documentación asociada con esta disciplina en soporte electrónico haciendo uso, fundamentalmente, del formato PDF. Sin embargo, la generación de toda esta documentación no se ha realizado de forma completamente coordinada, existiendo una cierta dispersión en el control y tratamiento de la misma, así como diferentes formas de clasificación y gestión. Por otro lado, la naturaleza de la documentación asociada (guías, manuales, procedimientos, normativas, ...) no se halla jerarquizada ni convenientemente estructurada, siendo, a veces, complicado encontrar los puntos de convergencia y divergencia para su aplicación o no en diferentes contextos.

El objetivo principal del Proyecto de Tesis Doctoral es realizar un análisis de la documentación existente, en el ámbito de la metrología eléctrica, mediante un estudio comparativo. El estudio, inicialmente, abarcará la documentación generada a nivel nacional en los distintos campos de la metrología eléctrica y, posteriormente, intercomparándola con la normativa generada por organismos metroológicos internacionales.

Para realizar una gestión eficaz, de toda la documentación necesaria para desarrollar el análisis, debe previamente llevarse a cabo el diseño de un sistema de consulta de la información, el cual debe permitir un fácil

acceso y consulta de la documentación, así como disponer de herramientas de mantenimiento que permitan disponer de las correspondientes actualizaciones de la información y de las posteriores modificaciones. El acceso a la documentación y la gestión eficaz de la misma puede realizarse haciendo uso de un sistema de bases de datos, el cual debe ser independiente del sistema operativo y del hardware del ordenador donde se ejecuta, permitiendo su empleo en el mayor número posible de equipos informáticos.

2. Metodología

El desarrollo del objetivo principal del Proyecto de Tesis Doctoral se realizará en las siguientes etapas:

- a) Determinar los organismos que generan la documentación específica.
- b) Acceder a la documentación.
- c) Estructurar y estudiar los contenidos.
- d) Análisis de los contenidos.
- e) Realizar una base documental con la documentación obtenida.
- f) Obtener unas conclusiones y propuestas finales.

En España una de las principales fuentes de información es el Centro Español de Metrología (CEM) [1], que es el Instituto Nacional de Metrología (National Metrology Institutes, NMI) que pertenece al Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología (European Association of National Metrology Institutes,

Análisis del Proceso de Fresado de Materiales Compuestos de Fibra de Carbono con Matriz Epoxy

A.J. Gómez López⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial.
Dirección: Paseo de las Viñas, nº1, Edif. Alborán, Portal 2, 4ªA. 11407 Jerez de la Frontera. Cádiz.
Teléfono de contacto: 620 46 78 05 / 670 65 86 93. e-mail: Antonio.J.Gomez@casa.eads.net

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial.
C/ Chile, 1. 11003 Cádiz

Resumen

Los materiales compuestos de matriz polimérica tienen gran interés en diferentes aplicaciones industriales, debido a sus buenas propiedades y a su bajo peso. Se trata de materiales con gran proyección de cara al futuro. El objeto de esta tesis es el estudio del proceso de fresado de un material compuesto de fibra de carbono y resina epoxy, predecir valores de rugosidad y fuerzas resultantes, así como una idea del desgaste de las herramientas que se producen cuando se mecanizan estos materiales. Para ello, además de una extensa lista de ensayos, se ha hecho una laboriosa labor de investigación, con objeto de llegar al estado del arte tanto de los materiales compuestos de fibra de carbono como del proceso de fresado de dicho material.

1. Introducción

Los materiales compuestos de matriz polimérica tienen gran interés en diferentes aplicaciones industriales, debido a sus buenas propiedades y a su bajo peso. Sus aplicaciones se han centrado hasta la fecha en los sectores aeronáutico y aeroespacial, aunque también han irrumpido en robótica, biomecánica y automoción. Se trata de materiales con gran proyección de cara al futuro.

En buena parte de las aplicaciones mencionadas, es necesario recurrir a procesos de mecanizado sobre elementos moldeados, con el fin de conferir las características dimensionales y de acabado requeridas. En particular, en aquellas aplicaciones en las que se deben materializar conjuntos mecánicos con ajustes y contactos entre diferentes piezas, es preciso garantizar alta calidad en el acabado, de modo que se hace necesario optimizar los procesos de mecanizado. Esta optimización debe comenzar sin duda alguna, por una adecuada caracterización de los procesos de mecanizado de estos materiales, analizando el comportamiento del material al interactuar con la herramienta de corte y el resultado de la operación. De manera singular, es fundamental conocer los parámetros funcionales de corte más apropiados (velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de pasada) y el tipo de

herramienta (convencional, especial), con el fin de optimizar la relación entre la calidad y el coste de la operación. Para conseguir optimizar dicha relación, se hizo un profundo estudio hasta llegar al estado del arte, tanto de los diferentes materiales compuestos, desde su composición, características técnicas y aplicaciones industriales, como de los diferentes procesos de mecanizado aplicables a estos materiales, el cual culminó en un Trabajo de Investigación realizado para la consecución del Diploma de Estudios Avanzados del Doctorado de Ingeniería de Fabricación [1], que es el precedente de esta Tesis, cuyo objetivo principal es encontrar un modelo de comportamiento en el proceso de fresado de materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxy, que prediga los valores de rugosidad y fuerzas resultantes, para unas variables de entrada dadas.

2. Metodología Experimental

Una de las partes más importantes de esta Tesis, es la experimental. Se van a realizar unos ensayos en los que se fresarán probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epoxy en una máquina de control numérico Kondia modelo Seaska 600, que es una máquina de alta velocidad de 5 ejes con configuración de mesa en cuna, la cual puede llegar a una velocidad de corte de 24000 rpm, Figura 1. A dicha máquina, se le acoplará un dinamómetro de mesa Kistler 9255B con amplificador 5019B,

con el que se analizarán, las fuerzas de corte resultantes en el proceso. Por último, mediante un rugosímetro Mahr Perthometer M2, se evaluará la calidad de la rugosidad de la probeta después del corte.



Figura 1. Kondia modelo Seaska 600

En la Figura 2 se muestra un esquema de la metodología que se usará para la fase experimental.

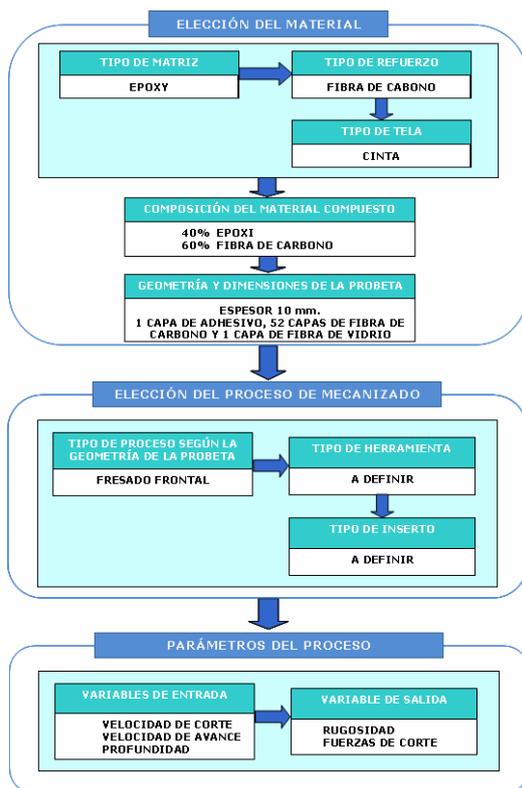


Figura 2. Esquema de la metodología en la fase experimental

También se usará un microscopio electrónico, con el que se estudiará el desgaste de la herramienta en sus filos de corte.

3. Resultados y Discusión

Como primera toma de contacto, durante el Trabajo de Investigación previo a esta Tesis, se hicieron diferentes pruebas de fresado frontal en materiales compuestos de fibra de carbono, tomando como variables de entrada la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad de corte, jugando con ellas hasta obtener unos parámetros de mecanizado que hicieran que el uso de la máquina fuese el más óptimo para el tipo de material que se estaba mecanizando.

Con los valores obtenidos se pudo hacer una primera aproximación a un modelo de corte en función de la profundidad, basada en una ecuación exponencial del modo:

$$Ra = f(v) = y = ma^n \quad (1)$$

Siendo “Ra” la rugosidad y “a” la profundidad de corte, el modelo resultante fue el siguiente:

$$y = 6,7618 a^{-0,2665} \quad (2)$$

En resumen, la rugosidad superficial que se alcanzó fue bastante satisfactoria con las velocidades de corte y avance utilizadas. La profundidad de corte influyó positivamente en la calidad superficial a medida que aumentaba ésta. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el material compuesto elegido para el ensayo, era un entrelazado apilado manualmente en el que muchas zonas de cruzado de los hilos no estaban completamente impregnadas de resina, lo que provocaban huecos en la superficie mecanizada, incidiendo directamente en los valores de rugosidad obtenidos.

El material que se utilizará en los ensayos de esta Tesis, es un laminado manual de 10 mm. de espesor aproximadamente, formado por una primera capa de adhesivo, seguida por 52 capas de cinta preimpregnada en resina epoxy con la orientación (-45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ 90°/ 90°/ 0°/ 0°/ 90°/ 90°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°/ 45°/ -45°) simétrico y una capa de fibra de vidrio.

Con los ensayos que se realizarán sobre estas probetas, además de la rugosidad superficial, se intentará buscar un modelo que prediga las fuerzas de corte que se generan durante el mecanizado, de manera que se pueda optimizar dicho proceso.

4. Referencias

- [1] Antonio J. Gómez. *Trabajo de Investigación del Diploma de Estudios Avanzados del Programa de Doctorado en Ingeniería de Fabricación*. Febrero de 2009

Aspectos de la simulación numérica del proceso de conformado de la chapa de aleación de aluminio de uso aeronáutico

M. Tornell Barbosa⁽¹⁾, M. Sánchez Carrilero⁽²⁾, M.A. Sebastián Pérez⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, ESI-UCA, Telf. 956015154, manuel.tornell@uca.es.

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. ESI. UCA

⁽³⁾Departamento de Ingeniería de Construcción Fabricación. ETSII. UNED

Resumen

En este trabajo se revisan los procesos de conformado de la chapa de aleación de aluminio, AW2024 T3 en la industria aeronáutica, como una secuencia de operaciones de estirado y doblado y se abordan los defectos más importantes que aparecen, como la rotura, la recuperación elástica y las arrugas. Se aborda un modelo numérico para la fractura dúctil que se puede implantar en una simulación mediante elementos finitos y se abre un enfoque para el tratamiento de la recuperación elástica y las arrugas dejándolos para un posterior estudio.

1. Introducción

Los procesos flexibles de conformado de la chapa fina (0.2-6 mm) de aleación de aluminio en la industria aeronáutica, son una secuencia de operaciones básicas entre las que destacan doblados y estirados. Estos procesos se adaptan al alto número de piezas a fabricar en pequeños lotes, las prensas empleadas [1] son de colchón de goma (proceso Guerín) o de hidroconformado (procesos Verson-Wheelon y Flexforming) en los que la matriz superior se sustituye respectivamente por un bloque de poliuretano o por un diafragma o vejiga inflable de neopreno que presiona la chapa a conformar sobre la matriz inferior.

A pesar de la irrupción de la fibra de carbono, la chapa de aleación de aluminio sigue teniendo un papel preponderante en las nuevas estructuras aeronáuticas, principalmente por el significativo avance en los últimos años en el desarrollo de nuevas aleaciones más ligeras, con mayor resistencia mecánica, más resistentes a la corrosión, soldables o con propiedades específicas para cada aplicación. La aleación de aluminio endurecible por precipitación, AW2024-T3 (ISO AlCu4Mg1) desarrollada en 1931, sigue siendo especificada, como chapa plaqueada o sin preplaquear en zonas estructurales de los aviones donde se requiere rigidez, resistencia y buen comportamiento a fatiga.

Se observa en los nuevos diseños de piezas de chapa una tendencia a integrar funciones, reduciendo su número, aumentando en contra su complejidad y haciendo más difícil su conformado sin defectos. Circunstancias que unidas al traslado de estos procesos maduros a

subcontratistas con poca experiencia, sugieren que sea importante el estudio de modelos numéricos, que permitan su integración en una simulación mediante el método de los elementos finitos, que usada como herramienta para optimizarlos permita mejorar su productividad eliminando operaciones posteriores.

Los principales defectos que aparecen en el conformado de la chapa aeronáutica figura 1, son las roturas que se producen por excesivas tensiones de tracción, la recuperación elástica que se produce al cesar las fuerzas de conformado cambiando la forma de la pieza y las arrugas que se originan al conformar la chapa en zonas de menor perímetro induciendo tensiones de compresión. La recuperación elástica y las arrugas son defectos que aparecen especialmente en el doblado de las faldillas de acoplamiento, a veces pretaladradas para los remaches, que afectan negativamente al montaje de las estructuras aeronáuticas y que se han de mantener bajo estrechas tolerancias dimensionales.



Figura 1. Defectos en el conformado

2. Fundamentos Teóricos

Para chapas de materiales de alta ductilidad, la rotura durante el conformado se inicia en una zona de estricción difusa, que conduce a una estricción localizada por donde finalmente se produce la rotura dúctil de la chapa. En la chapa de aleación de aluminio la rotura generalmente se produce antes de la estricción, en un mecanismo de fallo diferente. Situación que se observa en operaciones de estirado cuya tendencia es a incrementar la superficie de la chapa a costa de la reducción de su espesor. El diagrama límite de formabilidad (FLD) es una herramienta muy útil que sirve para limitar las deformaciones longitudinales de la chapa bajo diferentes estados de deformación plana caracterizados por $\beta = \frac{\varepsilon_2^p}{\varepsilon_1^p}$, siendo ε_1^p y ε_2^p la

máxima y la mínima deformación plástica en el plano de la chapa y que va desde $\beta=1$ para el estirado biaxial equilibrado a $\beta=-1/2$ para tracción uniaxial. La obtención de este diagrama requiere la realización de laboriosos ensayos que pueden reducirse significativamente con una simulación del proceso mediante el método de los elementos finitos y la aplicación de un criterio de fractura dúctil [2].

Para predecir el fallo dúctil de la chapa de aleación de aluminio AW2024-T3, diferentes teorías [3] se han venido aplicando; las más empleadas [2,4,5,6] se basan en la asunción de que la rotura dúctil es el resultado de un proceso de daño acumulativo que ocurre durante la deformación plástica. Se representan como una integral de una cierta función de daño, extendida a todo el proceso de deformación, la rotura se inicia cuando la integral alcanza un cierto valor. Entre estos criterios se selecciona para este trabajo el criterio propuesto por Oyanne (1) que incluye el efecto de la presión hidrostática en el proceso de rotura [4,5].

$$\frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f^p} \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_1 \right) d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1)$$

Donde $\bar{\varepsilon}^p$ representa la deformación plástica equivalente, $\bar{\varepsilon}_f^p$ la deformación plástica equivalente en la rotura, $\bar{\sigma}$ la tensión equivalente y σ_h la tensión hidrostática. C_1 y C_2 son constantes del material a determinar experimentalmente.

La chapa de aleación de aluminio se modela como una membrana con comportamiento elastoplástico, independiente de la velocidad de deformación y con endurecimiento isotrópico.

Para la condición de fluencia, o estado de tensión que provoca una deformación plástica,

se usa por su simplicidad el criterio cuadrático de Hill (1948), adecuado para materiales anisotrópicos ortotrópicos. Su representación en el espacio de tensiones es la superficie de fluencia, superficie que evoluciona durante la deformación plástica. En los ejes de simetría ortotrópica, que corresponden a los tres planos de simetría ortogonales, y que son, 1 el de laminación, 2 el transversal y 3 el normal en la dirección del espesor y asumiendo que la deformación se produce en un estado de tensión plana (tensiones en el espesor despreciable), el criterio de Hill queda reducido a:

$$f = (H+G)\sigma_{11}^2 + (H+F)\sigma_{22}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + 2N\sigma_{12}^2 - \bar{\sigma}^2 = 0 \quad (2)$$

Los coeficientes F, G, H y N son función de la anisotropía normal r de o de Lankford (3) que caracteriza la resistencia de la chapa al adelgazamiento en la dirección del espesor, y se obtienen experimentalmente de los ensayos de tracción uniaxial en probetas a 0° , 90° y 45° de la dirección de laminación.

$$G = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1-r_{0^\circ}}{1+r_{0^\circ}} \right) \quad F = \frac{r_{0^\circ}}{r_{90^\circ}(1+r_{0^\circ})} \quad (3)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_{0^\circ}-1}{1+r_{0^\circ}} \right) \quad N = \frac{3}{2} \frac{(1+2r_{45^\circ})(r_{0^\circ}+r_{90^\circ})}{3r_{90^\circ}(1+r_{0^\circ})}$$

La ley de flujo (4) asociada al criterio de Hill considera la perpendicularidad entre el incremento de la deformación plástica y la superficie de fluencia e indica su convexidad.

$$\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

La evolución de la superficie de fluencia se aproxima por la ley de Hollomon (5) que considera el endurecimiento isotrópico [5].

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^{-p^n} \quad (5)$$

Donde k es una constante del material y n el coeficiente de endurecimiento del material.

Obteniéndose de (3) y (4) los términos de la expresión (1) para tracción uniaxial (6) y para deformación plana (7) [5].

$$\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2(2+r)}}{\sqrt{3(1+r)}} \quad \text{y} \quad d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2(2+r)}{3(1+r)}} d\varepsilon_1 \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2(2+r)(1+2r)}}{\sqrt{3(1+r)}} \quad \text{y}$$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2(2+r)(1+r)}{3(1+2r)}} d\varepsilon_1 \quad (7)$$

Mediante ensayos experimentales de la chapa se hallan la deformación en la rotura en un ensayo de tracción uniaxial ($\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = -0.5$) y en un ensayo de casi deformación plana ($\beta = -0.16$) y las ecuaciones (1), (6) y (7) permiten hallar las constantes C_1 y C_2 . Mediante una simulación

numérica mediante el método de los elementos finitos aplicando el criterio de Oyanne se puede obtener el diagrama límite de formabilidad de la chapa.

La recuperación elástica de la chapa durante el conformado es necesario predecirla en la etapa de diseño de las matrices, para que estas se puedan compensar adecuadamente. Los factores que influyen en la recuperación elástica están relacionados con la geometría (de la pieza, espesor de la chapa, radio y ángulo de doblado) con el proceso (presión, tipo de prensa, tipo de lubricante o coeficiente de rozamiento y dureza de la goma) y con el material [7,8] (límite elástico, módulo de elasticidad, endurecimiento de material por trabajo en frío, anisotropía y variedad entre lotes) por lo que su predicción es tarea difícil.

En la teoría clásica de la plasticidad una descripción adecuada de la superficie de fluencia y su evolución son suficientes para la describir el comportamiento del material. Normalmente se asume un endurecimiento isotrópico lo que significa que la superficie se expande radialmente o proporcionalmente durante la deformación plástica. Esta asunción es efectiva para predecir las deformaciones plásticas, especialmente cuando estas son aproximadamente de un solo tipo y además proporcionales. Si no es así, el endurecimiento isotrópico puede no ser correcto [9], incluso cuando las deformaciones sean proporcionales. Después del conformado al retirar las piezas de chapa del utillaje experimentan recuperación elástica, durante esta descarga el material sufre el efecto Bauschinger que se relaciona con una translación de la superficie de fluencia, por lo tanto la asunción de endurecimiento isotrópico no predice adecuadamente el efecto Bauschinger y la recuperación elástica. Como simplificación se puede suponer que la superficie inicial de fluencia solo evoluciona trasladándose en el campo de tensiones, sin cambiar su forma y tamaño, es el endurecimiento cinemático y para describir la expansión y translación de la superficie de fluencia se considera la combinación de endurecimiento isotrópico y endurecimiento cinemático. De acuerdo con [8] en este trabajo no se tiene en cuenta el efecto Bauschinger, se usa la ecuación de endurecimiento isotrópico de Hollomon (5).

Se considera un elemento curvado, a flexión pura como el de la figura 2 correspondiente a un ángulo central $d\theta$, y por el equilibrio de fuerzas (8).

$$\frac{\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (8)$$

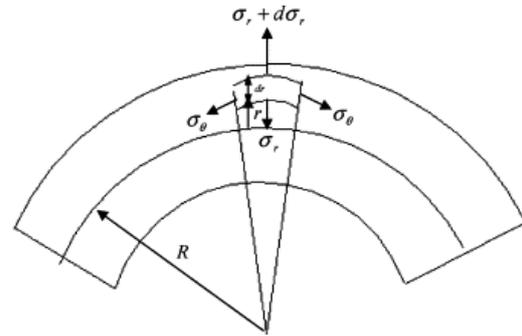


Figura 2. Estado de tensión en un elemento a flexión pura

A partir de la función de fluencia de Hill y de la regla de flujo asociada las expresiones para la tensión equivalente y la deformación equivalente pueden escribirse como (9).

$$d\bar{\epsilon}^p = C d\epsilon_r \quad \text{y} \quad \sigma_\theta - \sigma_r = C \bar{\sigma} \quad (9)$$

En [8] se calcula el momento de descarga y se determina el cambio de curvatura como la expresión (10).

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R^*} = \frac{3(1-\nu^2)}{Et^3} (I_1 + I_2) \quad (10)$$

Donde R es el radio antes de la descarga y R* después de la descarga y I1 y I2 son integrales que se definen en [8]. Mediante una simulación se pueden comparar los resultados obtenidos con los calculados por esta expresión.

Las arrugas se pueden originar en las faldillas cuando las tensiones σ_θ son de compresión y la goma superior no es capaz de mantener la chapa en contacto con la matriz inferior, figura 3. El remedio usual es aumentar la presión de la goma sobre la chapa incrementando la tensión radial σ_r , la contracción circunferencial que acompaña a esta alivia las tensiones de compresión en la faldilla. La presión a ejercer para evitar las arrugas es función de la anisotropía normal r, y será menor cuanto mayor sea r. La tendencia al arrugamiento de la chapa también depende de su módulo elástico, del espesor y del utillaje.



Figura 3. Arrugas en hidromoldadura, utillaje original y mejorado para aumentar la presión de la goma

3. Metodología Experimental

Para caracterizar la formabilidad de la chapa de aleación de aluminio AW-2024-T3 de 1.2 mm de espesor es necesario realizar ensayos uniaxiales de tracción, según la norma ASTM E 8M-04, en probetas en la dirección de laminación 0° , en la dirección transversal 90° y en la dirección diagonal 45° , cuyos resultados se adjuntan en la Tabla I [4].

El comportamiento plástico del material en la dirección de laminación se ajusta con la ley de Hollomon (5) con $n = 0.245$, y $k = 827.1$.

Para hallar las dos constantes del material que aparecen en el criterio de rotura de Oyanne se hallan la deformación en la rotura en el ensayo de tracción uniaxial ($\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = -0.5$) y en un ensayo de casi deformación plana ($\beta = -0.16$) valores adjuntos en la Tabla 2. Las constantes se calculan para que se cumpla el criterio en tracción uniaxial y en casi deformación plana.

Los límites de formabilidad de la chapa para diferentes estados de deformación también se determinan experimentalmente para lo que se realizan ensayos fuera del plano según ASTM E 517-98. Para reproducir diferentes estados de deformación plana se realizan ensayos de acopado de Erichsen con punzón esférico de 20 mm de diámetro, fuerza de sujeción de la chapa de 40 kN y sin lubricación, en probetas de ancho diferente 60, 45, 35, 30 y 25 mm y longitud constante de 60 mm. Previamente las superficies de las probetas se marcan con una malla de círculos de 2 mm de diámetro. Cuando el ancho de las probetas va de 60 a 25 mm el estado de deformación pasa de un estado equilibrado biaxial ($\beta = 1$) a un estado de casi deformación plana ($\beta = -0.16$). Se ensayan 4 probetas de cada ancho para estimar la carrera del punzón en el inicio de la rotura, esto es la carrera crítica del punzón.

Los coeficientes de la función de fluencia se obtienen de (3).

Tabla I. Propiedades del material y coeficientes de anisotropía plástica

E (GPa)	ν	σ_y a 0° (MPa)	UTS a 0° (MPa)	r 0° - 45° - 90°
66.7	0.33	335	526	0.84-1.00-0.77

Tabla II. Deformaciones longitudinales límites en tracción uniaxial y deformación plana

ε_{lf} (uniaxial) ($\beta = -0.5$)	ε_{lf} (biaxial) ($\beta = -0.16$)
0.235	0.183

4. Resultados y Discusión

El modelo de rotura dúctil empleado es un modelo ya probado para este tipo de aleaciones. Para tener unos resultados y una discusión sería necesario completar el trabajo con una simulación del proceso mediante el método de los elementos finitos con un software adecuado.

5. Conclusiones

Sería importante continuar con el estudio de los modelos numéricos de los defectos de recuperación elástica y de arrugas en la chapa AA2024 T3 producidos en los procesos aeronáuticos y verificarlos con una simulación mediante el método de los elementos finitos.

6. Referencias

- [1] G. Sala, A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: part II-aluminium alloys rubber forming, *Materials and Design* Vol. 22 (2001) 209-315
- [2] H. Takuda, K. Mori y otros, Finite element analysis of sheet metals allowing for ductile fracture *Int. J. Mech. Sc.* Vol. 42 (1998) 785-798
- [3] A.A. Zadpor, J. Sinke y otros, Formability prediction of high strength aluminium sheets, *Int. J. Plasticity* Vol. 25 (2009) 2269-2297
- [4] C. Valleano, C. Guzman y otros, Failure Prediction in Stretched Sheets of Aluminium 2024-T3, *Materials Science Forum* Vol. 526 (2006) 91-96
- [5] H. Takuda y N. Hatta, Numerical Analysis of the Formability of an Aluminum 2024 Alloy Sheet and its Laminates with Steel Sheets, *Met. and Materials Transactions A* Vol. 29A (1998) 2829-2834
- [6] Z. Yu, Z. Lin y otros, Evaluation of fracture limits in automotive aluminium alloy sheet forming, *Materials and Design* Vol. 28 (2007) 203-207
- [7] P. Kulkarni y S. Prabhakar, Influence of the effect of Strain Rates on Springback in Aluminum 2024, 4th European LS-DYNA Users Conference (1997), Metal Forming II
- [8] R. K. Vermat y A. Haldar, Effect of normal anisotropy on springback, *J. Mat. Proc. Tech.* Vol. 190 (2007) 300-304
- [9] K. Chung, M-G. Lee y otros, Springback evaluation of automotive sheets based on isotropy-kinematics hardening laws and non-quadratic anisotropic yield function. Part I : theory and formulation, *J. Mat. Proc. Tech.* Vol. 21 (2005) 861-882

Autómatas Celulares Difusos en Criptografía

F.J. Navarro Ríos, A.J. Tomeu Hardasmal

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz
Universidad de Cádiz, Calle Chile, número 1, 11002 Cádiz
Teléfono: 617 188 229, Correo Electrónico: francisco@ugr.es

Resumen

La tesis doctoral propone, por primera vez en la literatura, la utilización del modelo de cálculo teórico conocido como “autómatas celulares difusos” para realizar cifrados de información. Para ello, desarrollamos un software que haga evolucionar los autómatas, que realice cifrados de flujo y cifrados por bloques, que cifre y descifre utilizando una nueva función real con carácter involutivo, y que compruebe la bondad del sistema de cifrado mediante diversos tests de aleatoriedad sobre secuencias cifrantes generadas con las evoluciones de autómatas, y sobre los criptogramas obtenidos, y mediante análisis de la correlación entre textos en claro y sus criptogramas.

1. Introducción

El campo del conocimiento que trata la *Criptografía* es prácticamente tan antiguo como la escritura, y ha evolucionado junto con el resto de los desarrollos teóricos que el hombre ha ido realizando [1,2]. La búsqueda de sistemas de cifrado criptográficamente seguros es uno de los problemas más interesantes y abiertos que tienen planteados conjuntamente las Ciencias de la Computación y la Matemática Aplicada. El enfoque orientado al modelo matemático de los autómatas celulares convencionales (no difusos) es relativamente novedoso, y proporciona un espacio de desarrollo amplio y de múltiples posibilidades.

Los *autómatas celulares* son introducidos por John von Neumann en los años 60 [3], y reciben un gran impulso en los años 80, cuando Stephen Wolfram [4-6] los utiliza sistemáticamente como modelos representativos de sistemas dinámicos. La literatura recoge un autómata celular concreto, presentado por Stephen Wolfram en 1986 [5], con el cual se implementa un sistema de cifrado muy simple. Durante los años 90 y, hasta ahora, se publican multitud de trabajos que implementan cifrados basados en autómatas celulares: Howard Gutowitz (1993) [7], Nandi, Kar y Chaudhuri (1994) [8], Lefe (1996) [9], Sen, Shaw, Chowdhuri, Ganguly y Chaudhuri (2002) [10], Amparo Fúster y Dolores de la Guía (2007) [11], etc.

Por otra parte, la teoría de *conjuntos difusos* o borrosos se introduce en 1965 [12], con el célebre trabajo llamado “Fuzzy Sets”, de Lotfi Zadeh. Los *números difusos* empiezan a tener importancia con el trabajo de D. Dubois y H. Prade [13], sobre variables difusas y el manejo

de cantidades imprecisas. Los conjuntos difusos fueron aplicados por primera vez en la teoría de autómatas por W.G. Wee y K.S. Fu, a finales de los años 60 [14], dando lugar a los *autómatas celulares difusos*.

Los autómatas celulares difusos ya han sido utilizados con éxito en aplicaciones para la simulación de sistemas naturales, como, por ejemplo, la expansión del fuego en un bosque, y también en aplicaciones para la simulación de sistemas artificiales, como, por ejemplo, el desarrollo del tráfico en una ciudad, y en otras aplicaciones similares, por autores como Mingarelli en 2007 [15], Zhang, Li y Zhao en 2007 [16], Maji y Chaudhuri en 2007 [17], Mandelas, Hatzichristos y Prastacos en 2007 [18], Maji en 2008 [19], Basu y Basu en 2008 [20], Yacoubi y Mingarelli en 2008 [21], etc. Sin embargo, la aplicación del modelo difuso al ámbito de desarrollo de protocolos criptográficos es una cuestión aún no tratada en la literatura.

El objetivo fundamental de la tesis doctoral es el desarrollo, análisis, diseño e implementación (tanto hardware como software, aunque fundamentalmente bajo esta última vía de implementación) de nuevos sistemas criptográficos, que estarán basados en el modelo de cálculo teórico conocido como “autómatas celulares difusos”.

2. Resultados y Discusión

Desde que se definieron por primera vez los autómatas celulares difusos por W.G. Wee y K.S. Fu, a finales de los años 60 [14], y hasta nuestros días, con investigadores como Mingarelli en 2007 [15], Zhang, Li y Zhao en

2007 [16], Maji y Chaudhuri en 2007 [17], Mandelas, Hatzichristos y Prastacos en 2007 [18], Maji en 2008 [19], Basu y Basu en 2008 [20], Yacoubi y Mingarelli en 2008 [21], etc., se han utilizado habitualmente *tres operadores difusos* en los autómatas celulares: $a + b$, $a \cdot b$, \bar{a} , donde a y b son números difusos. Sin embargo, para nuestros propósitos criptográficos, nosotros vamos a definir *otro operador difuso*: $a \# b$, que va a consistir en la suma aritmética (módulo 1) sobre los números reales del intervalo $[0,1[$:

$$a \# b = (a + b) \pmod{1} = c \quad (1)$$

donde $a, b, c \in [0,1[$

Utilizaremos este nuevo operador tanto en el diseño de una función local de transición para la evolución del autómata, como en el diseño de una función real con carácter involutivo para el cifrado y descifrado de información (similar a la XOR clásica de los criptosistemas de flujo).

Tabla I. Comparación entre operadores binarios y difusos

Operadores binarios	Operadores difusos
$a + b$	$\min \{1, a + b\}$
$a \cdot b$	$a \cdot b$
\bar{a}	$(1 - a)$
$a \text{ XOR } b$	$a \# b$

En 1917, J. Mauborgne y G. Vernam, inventaron el cifrado de flujo. Desde entonces se ha utilizado la función XOR (la suma módulo dos) como algoritmo de cifrado y descifrado de información. En los años 90 [8], también se ha estado usando la función XNOR (su complementaria). Estos operadores trabajan sobre números binarios, o sea, se aplican bit a bit sobre la secuencia del mensaje (texto en claro), la clave (secuencia cifrante) y el criptograma, y tienen la característica de ser *involutivas*.

Los operadores XOR y XNOR funcionan muy bien con autómatas celulares booleanos [8], pero, en esta tesis, pretendemos trabajar con autómatas celulares difusos, así que uno de nuestros objetivos es encontrar o diseñar una función f que se aplique en el intervalo real $[0,1[$ y que tenga este comportamiento involutivo:

$$f(x, y) = z, \quad f(z, y) = x, \quad f(x, y) = z, \quad \dots \quad (2)$$

donde $x, y, z \in [0,1[$

Finalmente, diseñamos la siguiente función, y probamos su buen funcionamiento:

$$f(x, y) = \text{NOT}(x \# y) = z \quad (3)$$

donde x es el texto en claro, y es la secuencia cifrante, z es el criptograma, $\#$ es el nuevo

operador difuso, NOT es el complemento difuso, es decir, $\text{NOT}(x) = 1 - x$.

Los mensajes, las secuencias cifrantes y los criptogramas van a ser cadenas de números difusos. Para convertir un mensaje en claro (formado por caracteres) en una secuencia de números difusos, calculamos el grado de pertenencia g de la letra l al conjunto difuso mediante la función:

$$g(l) = (c(l) + 1) / 257 \quad (4)$$

donde c es la función que devuelve el valor decimal del código ASCII de la letra l .

Vamos a trabajar con autómatas celulares unidimensionales, con condición de frontera cilíndrica, y observaremos la celda central para la creación de la secuencia cifrante. Hemos parametrizado un tamaño del autómata de 128 celdas, un tamaño del mensaje de 1000 caracteres (ó 1000 evoluciones del autómata), y un radio = 1 para el vecindario, para varias (trece) funciones de transición diferentes que hemos diseñado, donde *ant*, *act* y *sig* son la celda anterior, celda actual y celda siguiente, respectivamente.

Tabla II. Funciones de transición

1	$\text{ant} \cdot \text{act} \cdot \text{sig}$
2	$0 \cdot \text{ant} + \text{act} \cdot \text{sig}$
3	$\text{ant} \cdot \text{act} + \text{sig} \cdot 0$
4	$\text{ant} + \text{act} + \text{sig}$
5	$0 \cdot \text{ant} + \text{act} + \text{sig}$
6	$\text{ant} + \text{act} + \text{sig} \cdot 0$
7	$1 - \text{ant} \cdot \text{act} \cdot \text{sig}$
8	$1 - \text{ant} \cdot \text{act} + \text{sig} \cdot 0$
9	$0 \cdot \text{ant} + 1 - \text{act} \cdot \text{sig}$
10	$\text{ant} \# \text{act} \# \text{sig}$
11	$0 \cdot \text{ant} \# \text{act} \# \text{sig}$
12	$\text{ant} \# \text{act} \# \text{sig} \cdot 0$
13	$\text{ant} \# 0 \cdot \text{act} \# \text{sig}$

Los cuatro operadores que se utilizan en estas funciones de transición son los cuatro operadores difusos. El programa va mostrando en la pantalla del ordenador todo el proceso paso a paso: Inicialización pseudoaleatoria del autómata, evolución del autómata celular difuso, creación de la secuencia cifrante, y tests de aleatoriedad sobre la secuencia cifrante.

- Test 1: Chi-Cuadrado para muestras del 50%.
- Test 2: Chi-Cuadrado para muestras del 25%.
- Test 3: Chi-Cuadrado para muestras del 10%.
- Test 4: Frecuencias de 0 y 1.
- Test 5: Frecuencias de 00, 01, 10 y 11.
- Test 6: 000, 001, 010, 011, 100 101, 110, 111.

En los tres últimos tests, denotamos cero (0) a los números difusos del intervalo $[0, 0.5[$, y uno (1) a los números difusos del intervalo $[0.5, 1[$. Interesa que los resultados de los seis tests sean cero o estén próximos a cero para que haya pseudoaleatoriedad.

Se observa que las seis primeras funciones no superan ningún test de aleatoriedad, porque tienen estadísticos muy elevados (igual o por encima de mil). Esto tiene una explicación lógica. Si observamos la evolución del autómata en el programa, veremos que todas las celdas tienden al estado difuso cero en el caso de las tres primeras funciones (que operan con el producto difuso) y al estado difuso uno en el caso de las tres siguientes funciones (que operan con la suma difusa).

Las siguientes tres funciones (7, 8, y 9) trabajan con el complemento difuso, y podemos observar, en el programa, que producen una secuencia cifrante que alterna entre ceros y unos, por eso superan los test 1 y 4, pero ninguno de los demás tests, así que estas funciones no nos sirven.

Las únicas funciones de transición que superan todos los tests de aleatoriedad son precisamente las cuatro últimas de la Tabla II, que trabajan con el nuevo operador difuso # que hemos diseñado en la tesis. Por consiguiente, acabamos de lograr otro de los objetivos de la tesis: Diseñar alguna función de transición que genere una secuencia cifrante que supere los tests de aleatoriedad. De las cuatro, vamos a elegir, por ejemplo, para seguir con la investigación, la Función 10, que tiene todos los estadísticos por debajo de cinco. Para asegurarnos más de la bondad de esta función de transición, ejecutamos el software varias (quince) veces, utilizando la Función 10 para hacer evolucionar autómatas, que se inicializan aleatoriamente en cada ejecución del programa, y obtenemos buenos resultados todos por debajo de cinco para el Test 1 y 4, por debajo de ocho para el Test 2, por debajo de veintitrés para el Test 3, por debajo de siete para el Test 5, y por debajo de quince para el Test 6.

El siguiente paso consiste en utilizar las secuencias cifrantes que genera el autómata celular difuso con la nueva función de transición que hemos diseñado (la Función 10) para cifrar una batería de textos en claro, a través de la función real involutiva que diseñamos, con la intención de medir la correlación entre los mensajes y los criptogramas producidos, y también comprobar la aleatoriedad de dichos criptogramas, aplicándoles los mismos tests de aleatoriedad que usamos anteriormente para las secuencias cifrantes. Para medir la correlación, hemos utilizado el coeficiente de correlación de Spearman, y hemos seleccionado siete textos en claro diferentes (filtrados y truncados a mil caracteres). El software que hemos desarrollado se encarga de ir contando los caracteres de un texto mayor hasta alcanzar los mil caracteres que tenemos como parámetro, y también de ir realizando un filtrado para eliminar caracteres

especiales que vayan a causar problemas (debido a que no se corresponden con ningún valor ASCII entre 0 y 255). Los resultados son buenos, porque, para todos los textos, el coeficiente de correlación es próximo a cero, y todos los tests de aleatoriedad están por debajo de 20, así que hemos obtenido otro de los objetivos del trabajo: Que no hubiera correlación entre mensajes y criptogramas con nuestro nuevo cifrado, y que los criptogramas superen los tests de aleatoriedad.

Finalmente, el software muestra cómo desciframos cada uno de los siete criptogramas con la función real involutiva que diseñamos y con la misma secuencia cifrante, obteniendo de nuevo los siete textos en claro originales.

A modo de ejemplo de lo que serían unos malos estadísticos en este caso, comprobamos los resultados de cifrar el Texto 1 con todas las funciones de transición que desechamos, pero hay que tener en cuenta que realmente jamás se debe cifrar con este tipo de funciones (cuyas secuencias cifrantes no superaron los tests de aleatoriedad), sino que esto es sólo para observar qué pasaría si lo hiciésemos, y que veamos la gran diferencia que hay en los estadísticos: Coeficiente de correlación próximo a -1 , y todos los tests de aleatoriedad por encima de 800.

3. Conclusiones

De las aportaciones previstas de la tesis, ya se han realizado con éxito los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Faltan los puntos 7 y 10. También se han cumplido satisfactoriamente los puntos 8 y 9 con respecto al cifrado de flujo:

1. Una nueva formulación matemática del modelo de los autómatas celulares difusos, puesto que necesitaremos definir nuevos operadores difusos que hagan evolucionar autómatas de forma pseudoaleatoria.
2. Desarrollo de técnicas de simulación del modelo.
3. Verificación de las propiedades pseudoaleatorias de instancias del modelo, mediante el desarrollo de baterías de tests de aleatoriedad.
4. Obtención de una base de datos de instancias con buenas propiedades pseudoaleatorias.
5. Búsqueda o diseño de una función con carácter involutivo que opere sobre números reales del intervalo $[0,1]$ (números difusos) para realizar el cifrado y el descifrado de información (que tenga el mismo comportamiento que las funciones existentes para datos booleanos). Para ello, puede ser necesaria la creación de nuevos operadores difusos.

6. Integración del modelo en protocolos criptográficos de cifrado de flujo.
7. Eventualmente, integración del modelo en protocolos de cifrado por bloques (de Feistel).
8. Criptoanálisis de los protocolos criptográficos desarrollados, mediante tests de aleatoriedad sobre las secuencias cifrantes y sobre los criptogramas, mediante análisis de correlación entre textos en claro y sus criptogramas, y mediante otras técnicas que desarrollaremos.
9. Implementación software de los sistemas de cifrado anteriores.
10. Eventualmente, implementación hardware de algunos de los sistemas de cifrado indicados.

4. Referencias

- [1] A.J. Menezes, P.C. van Oorschot, and S.A. Vanstone. “*Handbook of Applied Cryptography*”. CRC Press, 1996.
- [2] B. Schneier. “*Applied Cryptography*”, Second Edition. John Wiley & Sons, 1996.
- [3] J. von Neumann. “*Theory of Self-reproducing Automata*”. University of Illinois, Press Urbana, 1966.
- [4] S. Wolfram. “*Cellular Automata*”. Los Alamos Science, 9, pages 2-21, 1983.
- [5] S. Wolfram. “*Theory and Applications of Cellular Automata*”. World Scientific, 1986.
- [6] S. Wolfram. “*Cellular Automata and Complexity: Collected Papers*”. Perseus Publishing, 1993.
- [7] H. Gutowitz. “*A Massively Parallel Cryptosystem Based on Cellular Automata*”. ESPCI, Paris, France, 1993.
- [8] S. Nandi, B.K. Kar, and P.P. Chaudhuri. “*Theory and Applications of Cellular Automata in Cryptography*”. Proceedings of the IEEE Transactions on Computers, volume 43, number 12, pages 1346-1357, December 1994.
- [9] O. Lafe. “*Data Compression and Encryption using Cellular Automata Transforms*”. Proceedings of the IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems (IJSIS), pages 234-241, 1996.
- [10] S. Sen, C. Shaw, D.R. Chowdhuri, N. Ganguly, and P.P. Chaudhuri. “*Cellular Automata based Cryptosystem*”. ICICS, pages 303-314, Singapore, December 2002.
- [11] A. Fúster, and D. de la Guía. “*Modelling Nonlinear Sequence Generators in Terms of Linear Cellular Automata*”. Applied Mathematical Modelling, volume 31, number 2, pages 226-235, 2007.
- [12] L.A. Zadeh. “*Fuzzy Sets*”. Information and Control, 83, pages 338-353, 1965.
- [13] D. Dubois, and H. Prade. “*Theorie des Possibilities*”. Masson, Paris, France, 1985.
- [14] W.G. Wee, and K.S. Fu. “*A Formulation of Fuzzy Automata and its Application as a Model of Learning Systems*”. Proceedings of the IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetic, volume 5, number 5, pages 215-223, July 1969.
- [15] A.B. Mingarelli. “*A Classification Scheme of Fuzzy Cellular Automata with Applications to ECA*”. Proceedings of the 13th International Workshop on Cellular Automata (Automata 2007), The Fields Institute, Toronto, Canada, August 27-29, 2007.
- [16] K. Zhang, Z. Li, and X.O. Zhao. “*Edge Detection of Images based on Fuzzy Cellular Automata*”. Proceedings of the 8th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, pages 289-294, IEEE Computer Society Press, 2007.
- [17] P. Maji, and P.P. Chaudhuri. “*RBFCA: a Hybrid Pattern Classifier using Radial Basis Function and Fuzzy Cellular Automata*”. Fundamenta Informaticae, volume 78, number 3, pages 369-396, 2007.
- [18] E.A. Mandelas, T. Hatzichristos, and P. Prastacos. “*A Fuzzy Cellular Automata Based Shell for Modeling Urban Growth – A Pilot Application in Mesogia Area*”. Proceedings of the 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Aalborg University, Denmark, 2007.
- [19] P. Maji. “*On Characterization of Attractor Basins of Fuzzy Multiple Attractor Cellular Automata*”. Fundamenta Informaticae, volume 86, issues 1, 2, pages 143-168, October 2008.
- [20] S. Basu, and S. Basu. “*Different Types of Linear Fuzzy Cellular Automata and their Applications*”. Fundamenta Informaticae, volume 87, issue 2, pages 185-205, November 2008.
- [21] S. Yacoubi, and A.B. Mingarelli. “*Controlling the Dynamics of the Fuzzy Cellular Automaton Rule 90, I*”. Proceedings of the 8th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Yokohama, Japan, September 23-26, 2008. Lecture Notes in Computer Science, volume 5191, pages 174-183, 2008.

Caracterización de Instalaciones Fotovoltaicas Mediante Técnicas de Termografía Infrarroja

G. Álvarez Tey⁽¹⁾, J. Carpio Ibáñez⁽²⁾, R. Jiménez Castañeda⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior de Ingeniería, UCA, C/Chile 1, 11002 Cádiz, tlf.: + 34 956 015156, e-mail: German.Alvarez@uca.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control, E.T.S. Ingenieros Industriales, U.N.E.D., C/ Juan del Rosal 12, 28040 MADRID

Resumen

La termografía infrarroja (IR) es una herramienta que puede ser utilizada con objeto de caracterizar el comportamiento de instalaciones fotovoltaicas (FV). La caracterización puede ser de tipo cualitativa si se pretende determinar defectos parciales (puntos calientes, suciedad, desacoplamiento de células, etc). La caracterización puede ser de tipo cuantitativo si se pretende determinar las pérdidas de potencia asociada a un sistema FV respecto a un estado de referencia. Para esto último es necesario tener en cuenta las diferentes variables que contribuyen a un determinado comportamiento térmico.

1. Introducción

En los últimos años se viene produciendo un importante crecimiento a nivel mundial en el número de instalaciones FV, en la potencia instalada y en la energía proporcionada. El desarrollo tecnológico alcanzado, la reducción de costes y el sistema de incentivos establecido en muchos países de la UE, con objeto de impulsar el uso de esta fuente de energía renovable, ha provocado un avance sin precedentes en el sector fotovoltaico, especialmente en España [1,3].

Debido a la fuerte demanda de instalaciones FV se ha producido la introducción en el mercado de productos de tecnologías no muy desarrolladas creando incertidumbre respecto a su fiabilidad a largo plazo. En algunos casos las instalaciones FV se basan en criterios en los cuales el diseño, el montaje y el mantenimiento se han llevado a cabo de forma no óptima. Por consiguiente, se hace necesaria la consideración de técnicas alternativas de inspección que permitan conocer el comportamiento energético de las mismas. Esta situación puede ser especialmente acusada en instalaciones integradas en fachadas o tejados. El conocimiento de dicho comportamiento es vital para evaluar la rentabilidad económica de los sistemas, y ofrecer confianza al sistema financiero especialmente en épocas de crisis y desconfianza generalizada en los mercados.

Por otra parte, la mayoría de los fabricantes de módulos FV garantizan durante al menos 25 años una potencia mínima del módulo en condiciones estándar de medida. Esto puede

provocar discrepancias entre propietarios y fabricantes respecto al cumplimiento de las condiciones de garantía. Es previsible que dentro de unos años se constate la previsible degradación de los módulos fotovoltaicos y puedan determinarse las consecuencias sobre el rendimiento energético de instalaciones actualmente en funcionamiento. En consecuencia se considera de especial relevancia, disponer de técnicas de análisis fiables y de aplicación industrial para las plantas FV en servicio en la actualidad y las que se construirán en el futuro.

En este contexto, la tesis doctoral relacionada con la presente comunicación, se desarrolla según los siguientes objetivos:

- 1.- Desarrollar una técnica de análisis basada en la medida de temperatura, sin contacto, que permita evaluar la pérdida de potencia eléctrica de instalaciones FV respecto a su condición de comportamiento de referencia.
- 2.- Desarrollar una metodología de inspección de instalaciones FV basada en termografía IR que permita caracterizar el comportamiento térmico de las mismas (puntos calientes, suciedad superficial, desacoplo de células en módulos, etc).
- 3.- Proponer un procedimiento sistemático para aplicar la metodología desarrollada a plantas FV industriales de todo tipo.

2. Antecedentes y estado actual del tema

En la actualidad la medida de temperatura de módulos FV se realiza mediante sensores de

contacto y de forma puntual. La norma UNE-EN 61724 [4] sobre monitorización de sistemas fotovoltaicos especifica que la temperatura del módulo FV se ha de medir en aquellos que sean representativos de las condiciones del campo de módulos FV por medio de sensores de temperatura colocados en la parte posterior de uno o más módulos. La utilización de sensores de contacto para medición puntual puede ofrecer una indicación errónea de la temperatura real del módulo debido a las condiciones en las que se realice la medida. Hay que destacar que la temperatura del módulo FV influye en el funcionamiento del mismo, reduciendo su eficiencia cuanto mayor sea la misma y dependiendo esta influencia de la naturaleza y materiales que componen el módulo FV.

La termografía infrarroja es una herramienta que permite caracterizar el comportamiento térmico de los cuerpos de acuerdo a la energía térmica emitida por los mismos. Sus diferencias fundamentales respecto a la medición de temperatura convencional por contacto son las siguientes:

- La medida se realiza de forma remota y sin contacto.
- La medida es bidimensional.
- La medida se realiza en tiempo real.

Las aplicaciones actuales de la termografía IR son muy diversas. Entre otras, se pueden citar las siguientes: mantenimiento eléctrico y mecánico, mantenimiento de edificios, monitorizado de procesos en industria, control de calidad, medicina y veterinaria, ensayos no destructivos e investigación y desarrollo.

En el área de ingeniería fotovoltaica, la termografía IR se utiliza en la actualidad a escala de laboratorio, principalmente, para la localización de puntos calientes en células solares consolidándose como una herramienta fiable para las diferentes tecnologías existentes.

La termografía también es utilizada en control de calidad de fabricación de módulos FV mediante la aplicación de una corriente inversa que permita detectar células o conexiones defectuosas con antelación al proceso de laminación final. A nivel de ensayo de campo en instalaciones FV las aplicaciones están orientadas a la detección de defectos de forma cualitativa.



Figura 1. Módulo FV con células calientes.

3. Planteamiento de la tesis

La forma más simple de caracterizar la temperatura de célula consiste en utilizar la temperatura de operación nominal de célula (TONC). El valor de este parámetro es proporcionado por el fabricante del módulo FV. La TONC de acuerdo a UNE-EN 61215 [5] y UNE-EN 61646 se define como la temperatura de la célula en equilibrio de un módulo montado en una estructura abierta operando en las siguientes condiciones: irradiancia total sobre el plano del módulo de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de 20°C , velocidad del viento de $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y sin carga eléctrica (circuito abierto). La TONC puede ser utilizada por el diseñador del sistema como indicativo de la temperatura a la que el módulo opera en campo, siendo un parámetro útil en la comparación del comportamiento de diferentes diseños de módulos. Si se conoce la temperatura ambiente (T_{amb}), la temperatura de operación nominal de célula (TONC) y la irradiancia (G) se puede estimar la temperatura de la célula FV (T_{cel}) mediante la expresión (1):

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{TONC - 20}{800} \cdot G \quad (1)$$

En la práctica la temperatura del módulo FV estará influenciada por las condiciones ambientales en las que se encuentre sometido (temperatura ambiente, irradiancia, humedad, velocidad del viento y dirección del viento). De acuerdo a esto es posible considerar el método de Redes Neuronales establecido por TamizhMani [7] para analizar los datos recopilados del análisis de módulos FV correspondientes a diferentes tecnologías. Este método relaciona de forma lineal la temperatura del módulo con las condiciones ambientales de la siguiente forma:

$$T_{mod} = \omega_1 \cdot T_{amb} + \omega_2 \cdot G + \omega_3 \cdot V_{vien} + \omega_4 \cdot dirV_{vien} + \omega_5 \cdot H + const \quad (2)$$

Los coeficientes (ω_i) y const son calculados para 6 tecnologías (A.Si, Mono-Si, CIS, EFG-Poly Si, Poly-Si y CdTe) después de recopilar datos meteorológicos y ambientales durante dos años en dos ubicaciones por dos laboratorios diferentes (National Renewable Energy Laboratory en Colorado y Photovoltaic Testing Lab en Univ. Arizona). Además de las condiciones ambientales y meteorológicas consideradas por los métodos anteriores, existen circunstancias adicionales que puedan modificar tanto de forma parcial como de forma completa la temperatura del módulo, entre ellas se puede citar:

- El punto de operación I-V del módulo.
- La existencia de suciedad superficial.
- La degradación del módulo (puntos calientes, células desacopladas, degradación óptica, etc)
- El modo de instalación y disposición del campo FV
- El entorno cercano al módulo, en especial en instalaciones integradas en edificios (BIPV)

Se hace necesario plantear otros modelos térmicos que consideren las condiciones de funcionamiento reales de los sistemas FV de forma que pueda ser estimada la temperatura de módulo FV para las diferentes tecnologías teniendo en cuenta las diferentes condicionantes externas. Con objeto de limitar y simplificar el estudio se están considerando módulos FV planos formados por 3 capas (frontal, central y posterior) suponiendo que la capacidad térmica de los materiales que constituyen los módulos FV es despreciable de forma que se analiza el comportamiento térmico del sistema en régimen estacionario.

Mediante la realización de una inspección termográfica IR, una vez establecida la metodología adecuada, se comprueba la uniformidad de temperatura, es posible la obtención de la temperatura del módulo en toda su superficie frontal o posterior, y por extensión una vez establecido el procedimiento de sistematización correspondiente la del conjunto de módulos que conforman el campo FV.

Como consecuencia de la caracterización que se propone en esta tesis, con objeto de cuantificar la pérdida de potencia referida a condiciones estándar de medida (CEM), y en aquellas situaciones en las que se compruebe uniformidad de temperatura en el modulo FV ensayado bajo condiciones reales de operación, será posible obtener por termografía el valor de temperatura de módulo (T_{mod}) en condiciones de irradiancia y temperatura ambiente conocidas. A partir de los valores medidos y si la velocidad del viento es limitada, será posible estimar la potencia real de trabajo en CEM mediante la expresión (3):

$$P_{real} = P_{nom} \left(\frac{G}{G_0} \right) (1 + \delta \cdot \Delta T) \quad (3)$$

- P_{nom} : Potencia nominal del módulo (proporcionada por fabricante en CEM)
- G : Irradiancia medida (W/m²)
- G_0 : Irradiancia en CEM (1000 W/m²)
- δ : Coeficiente de temperatura de la potencia de pico (proporcionada por fabricante en CEM)
- ΔT : Incremento de temperatura en el módulo respecto a temperatura de 25 °C ($T_{mod} - 25^\circ\text{C}$)

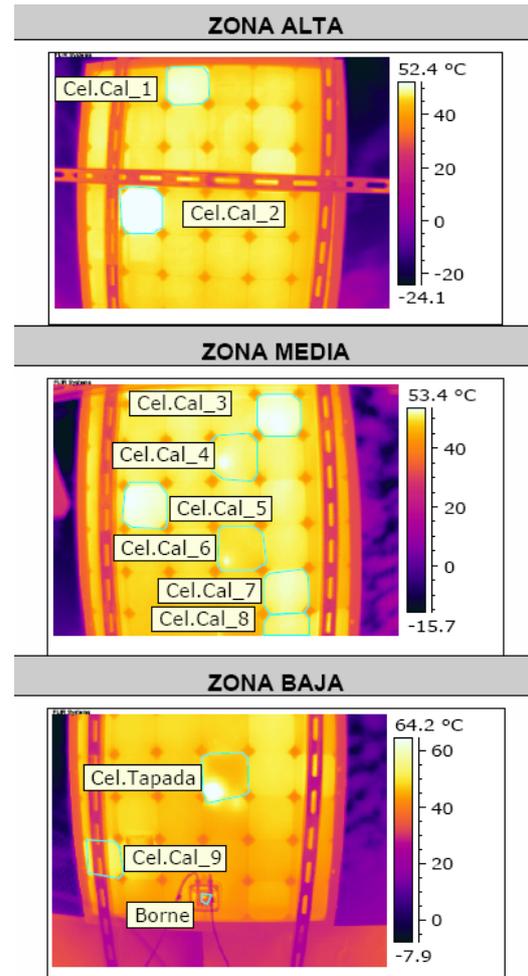


Figura 2. Ensayo y análisis de resistencia a la formación de puntos calientes.

4. Metodología experimental

La utilización adecuada de la termografía IR permite caracterizar el comportamiento térmico de los sistemas FV de forma más completa. En primer lugar, es posible conocer la temperatura superficial del conjunto de módulos que integran el sistema FV. Debido a ello, es posible caracterizar la pérdida de potencia referida a CEM, detectar un posible desacoplo de células o de módulos, identificar puntos calientes que

puedan degradar el comportamiento del sistema, valorar el efecto de la existencia de suciedad superficial o sombreado parcial o incluso evaluar la existencia de otras causas de degradación que provoquen una alteración térmica.

La metodología experimental que se está desarrollando se estructura en las siguientes fases:

1º Fase: Desarrollo de Metodología de inspección termográfica en módulos FV

El objetivo fundamental de esta fase es determinar la temperatura real de módulos FV de diferentes tecnologías mediante termografía IR una vez que se comprueba que presentan uniformidad de temperatura. Se deben considerar los siguientes aspectos:

- Conocimiento de los parámetros ambientales de contorno durante la inspección (temperatura ambiente, humedad relativa, distancia de inspección, etc).
- Determinación del lugar de realización de inspección: parte frontal del sistema FV o parte posterior.
- Determinación de la emisividad superficial de módulos FV (frontal o posterior según inspección)
- Determinación del ángulo idóneo de inspección IR con objeto de minimizar la radiación solar reflejada. Es necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el plano de los módulos FV.
- Consideración sobre el uso de lentes IR y filtros IR.
- Desarrollo de técnicas de análisis que permitan determinar la temperatura de módulos del sistema FV.

La comprobación de resultados y de ajuste de la metodología propuesta consiste en la obtención de la temperatura de módulo mediante sensores convencionales de contacto convenientemente calibrados. La utilización de al menos 2 sensores de contacto simultáneamente permitirá la comparación de resultados por ambos métodos con lo que se podrá conocer la idoneidad de la metodología propuesta basada en termografía IR. Se consideran las diferentes tecnologías de sistemas fotovoltaicos de la que se deducirán las conclusiones que correspondan.

De forma paralela al desarrollo de metodología y con los resultados individuales de los diferentes ensayos planteados (parámetros ambientales medidos por estación meteorológica y temperaturas de módulos FV obtenidas) se verifica la idoneidad de los modelos térmicos teóricos considerados.

2ª Fase: Aplicación de Metodología de Inspección termográfica en instalaciones FV reales

Una vez desarrollada y ajustada la metodología de inspección se procederá a aplicar la misma a instalaciones FV reales que podrán estar formadas por múltiples módulos FV de más de una tecnología y/o fabricante.

Inicialmente se recopilarán los datos básicos del sistema FV a ensayar (tecnologías, fabricantes, modelos de módulos FV, especificaciones técnicas de los mismos en CEM, identificación de la posición de los módulos, etc). También es necesario conocer con la instrumentación adecuada las condiciones ambientales existentes durante el ensayo (temperatura ambiente, humedad relativa, irradiancia, velocidad del viento y dirección del mismo). Es importante considerar la ausencia de condiciones externas variables durante la realización de los ensayos que puedan afectar a la variación de los resultados obtenidos (nubes, sombreado parcial, etc)

El procedimiento de inspección debe detectar los posibles defectos puntuales que pudieran presentarse por lo que será necesario una inspección sistematizada y completa de la instalación bajo estudio.

Para comprobar que los módulos no presentan defectos puntuales, se realizará un muestreo para determinar la temperatura en varios de dichos módulos pertenecientes a la instalación. El número de módulos sin defectos a ensayar podrá depender de la potencia de la instalación debiendo determinarse para cada uno su temperatura. La validación de los resultados obtenidos para las temperaturas medidas se realiza mediante la aplicación de dichos datos sobre el modelo térmico teórico establecido previamente. Posteriormente se determina la potencia real de cada uno de los módulos ensayados.

Para la aplicación de la metodología experimental se cuenta con la colaboración de:

1) Laboratorio de Energía Solar de la UCA, utilizando los recursos técnicos disponibles (estación meteorológica, trazador de curvas I-V, etc) así como módulos FV de diferentes tecnologías sometidos a condiciones de operación reales.

2) Laboratorio de Metrología Eléctrica y Calibración de la UCA, el cual proporciona los medios técnicos necesarios (cámara de termografía IR, equipos de medición eléctricos y de temperatura, etc).

También se dispone de acceso a instalaciones FV reales (instalación FV de 100kWp y otras de diferente potencia) de forma que sea posible la

caracterización propuesta en diferentes condiciones reales de medida.

5. Resultados

En las figuras 3 y 4 se muestran termografías frontales de módulos FV en condiciones reales con objeto de estudiar el comportamiento frente a sombreado parcial sobre célula (figura 3) y el efecto de la radiación solar reflejada (figura 4).



Figura 3. Módulo FV con célula sombreada.

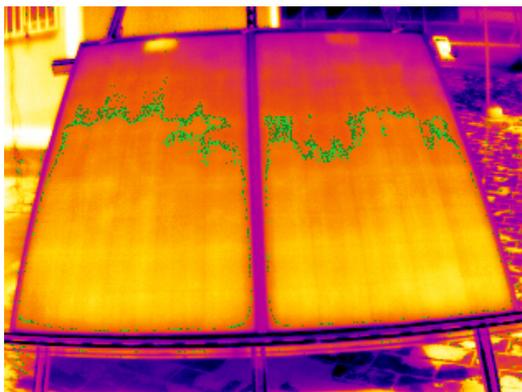


Figura 4. Ensayo con radiación solar reflejada

6. Referencias

[1] “Hacia un suministro sostenible de electricidad. La energía solar fotovoltaica en España”. Informe Anual 2008. ASIF. 2008. Disponible en: <http://www.asif.org/>

[2] “Solar Generation V -2008” (septiembre 2008). EPIA (European Photovoltaic Industry Association)

[3] “Cost and performance trends in grid-connected photovoltaic systems and case studies”; Report IEA-PVPS T2-06:2007

[4] Norma UNE-EN 61724 (Abril 2000). Monitorización de sistemas fotovoltaicos. Guías para la medida, el intercambio de datos y el análisis.

[5] Norma UNE-EN 61215 (Marzo 2006). Módulo fotovoltaico (FV) de silicio cristalino para uso terrestre. Cualificación de diseño y homologación

[6] G.M. Tina, S. Scrofolani (University of Catania, Italia); “Experimental verification of thermal behaviour of photovoltaic modules”; IEEE 2008

[7] G. TamizhMani, L. Ji, Y. Tang and L. Petacci; “Photovoltaic module thermal/wind performance: long-term monitoring and model development for energy rating”; NCPV and Solar Review Meeting, 2003

[8] A. Moropoulou, J. Palyvos, M. Karoglou, V. Panagopoulos; “Using IR thermography for photovoltaic array performance assessment”; 4th International Conference on NTD; October 2007

[9] J. P. Rakotoniaina, M. H. Al Rifai, O. Breitenstein (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Weinberg, Germany); “Quantitative analysis of the influence of shunts in solar cells by means of lock-in thermography”; 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18, 2003 Osaka, Japan

[10] Sandra Bau, Dominik M. Huljić, Jürg Isenberg, Jochen Rentsch (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany); “Shunt-analysis of epitaxial silicon thin-film solar cells by lock-in thermography”; IEEE 2002

[11] J. Isenberg, A.S.H. van der Heide and W. Warta; “Spatially resolved assessment of power losses due to bulk material quality and metalization problems”; IEEE 2005

Consideraciones sobre la evaluación de la temperatura en procesos de mecanizado

C. García López⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Eléctrica, c/Chile, 1 11002 Cádiz, 956015150, carmen.garcia@uca.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, mariano.marcos@uca.es

Resumen

Este trabajo se desarrolla en el contexto del desarrollo de una propuesta metodológica sobre ensayos de mecanizado. Durante estos ensayos se considerará la adquisición de datos de magnitudes tales como temperatura, fuerza y aceleración para diferentes parámetros de corte. En un posterior estudio se considerará la correlación entre estas magnitudes y el estudio sobre la integridad superficial de los materiales. Se plantean aquí algunos aspectos sobre los métodos de evaluación de la temperatura en estos procesos.

1. Introducción

Los procesos de mecanizado están asociados a la aparición de altas temperaturas en la zona de corte. La concentración de calor en el área de contacto, puede suponer alteraciones en la herramienta que llevan a su desgaste, dando lugar a pérdida en la calidad en las piezas y a una disminución del rendimiento del proceso. Así, es de particular importancia examinar en detalle los diferentes factores que pueden influir en la distribución de temperatura en la interfase entre la herramienta y la viruta.

En la revisión bibliográfica que se está llevando a cabo, se están analizando diferentes técnicas de medida en los procesos de mecanizado [1,2].

Estas técnicas se pueden clasificar en técnicas de medida por conducción y por radiación.

Las técnicas de medida por conducción se basan en efecto termoeléctrico. Los métodos más extendidos son el termopar dinámico y termopar insertado. [3] utiliza la técnica de termopar dinámico para comparar la temperatura en la zona de corte en un sistema de mínima lubricación frente a un sistema en seco.

La técnica de termopar insertado, se basa en la utilización de termopares normalizados insertados en la herramienta o en la pieza, en una zona lo más próxima posible al punto de interfase. Es necesario realizar orificios en la herramienta, y como consecuencia ésta pierde dureza y se puede alterar a conducción de calor en la herramienta [4].

Las técnicas de radiación consisten en la medida sin contacto, basadas en efectos termográficos. Con este método se estudia la radiación térmica emitida por la herramienta, la pieza y la viruta, a fin de establecer una imagen térmica. Mediante un pirómetro infrarrojo se puede obtener la

medida en un punto [5], mientras que la utilización de fotografías o imágenes térmicas permiten evaluar la temperatura en un área.

La medida de temperatura mediante cámaras termográficas se ha extendido en investigación en los últimos años. La principal ventaja que ofrece la cámara infrarroja es que es una técnica sin contacto de forma que no altera la temperatura del campo a medir. El principal problema que presenta esta técnica es determinar de forma precisa la emisividad del material que se está utilizando [6].

2. Metodología Experimental

En la metodología experimental que se propone (figura 1), para un determinado sistema de mecanizado, y con diferentes parámetros de corte, se procederá al estudio de diferentes magnitudes, a fin de poder establecer correlación entre estos parámetros.

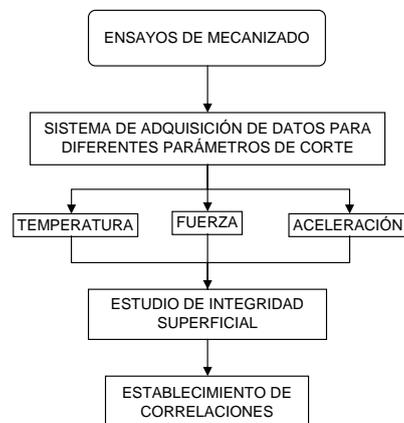


Figura 1. Esquema de la metodología propuesta.

En un posterior estudio sobre la integridad superficial de los materiales, se pretende establecer una posible relación entre las magnitudes obtenidas en diferentes condiciones de mecanizado y este estudio sobre acabado superficial.

Se plantean en este trabajo algunas consideraciones sobre la adquisición de datos y evaluación de temperatura en este proceso.

Para la evaluación experimental de la temperatura, se aplicarán tanto técnicas de conducción (termopar insertado) como técnicas de radiación (imágenes termográficas). El objetivo es poder comparar los resultados obtenidos en ambas técnicas, a fin de extraer las conclusiones pertinentes.

Para la medida mediante termopar se dispone de termopares miniatura tipo K en vaina de Inconel con aislamiento mineral de 0,25 mm de diámetro, que se insertarán en la herramienta preparada expresamente para ello (Figura 2). La lectura del termopar se realizará con un equipo registrador de temperatura, que proporciona lecturas directamente en °C.



Figura 2. Detalle de ranura en la herramienta para inserción de termopar

La evaluación de temperatura mediante termografía infrarroja se realizará con la cámara FLIR ThermaCAM S60 (Figura 3). Se realizarán ensayos para diferentes parámetros de corte, y diferentes materiales, y posteriormente se analizarán los resultados (Figura 4). Previamente, es necesario determinar de forma experimental la emisividad tanto del material que se va a mecanizar como de la herramienta. La emisividad de un material depende tanto de su composición como de su acabado superficial; por este motivo no se considera oportuno utilizar valores tabulados. La emisividad se va a determinar calentando el material por encima de temperatura ambiente y ajustando la lectura de la cámara hasta que coincida con la lectura de un termopar pegado en la superficie que proporcione la lectura real. Debido a que la

superficie a considerar es metálica, y el valor esperado de emisividad es pequeño, se considerará el estudio de emisividad en una cavidad negra a fin de eliminar la influencia de la radiación térmica reflejada del entorno.

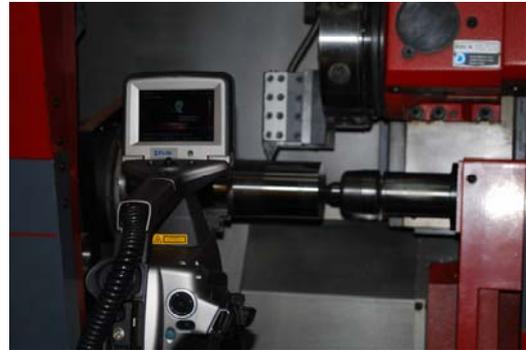


Figura 3. Realización de ensayo mediante termografía.

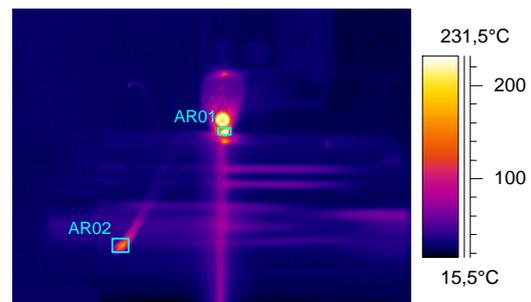


Figura 4. Imagen termográfica.

3. Resultados y Discusión

Actualmente se están diseñando y ajustando los métodos a emplear, por lo que los primeros resultados obtenidos no pueden considerarse fiables, sino tan sólo orientativos.

El objetivo es realizar varios ensayos de mecanizado con diferentes parámetros de corte, y aplicar los métodos de medida establecidos para evaluar la temperatura en la zona de corte.

4. Conclusiones

Para la determinación de la temperatura utilizando técnicas de medida por contacto, se altera las características del medio a medir. En la medida por radiación, hay que tener en cuenta la reflexión de radiación térmica del entorno. En ambos casos hay que realizar un estudio de la incertidumbre asociada a los procesos de medición, estudiando las magnitudes de influencia.

5. Referencias

- [1] Davies, M.A., Ueda, T., M'Saoubi, R., Mullany, B. & Cooke, A.L. 2007, "On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 581-604.
- [2] Komanduri, R. & Hou, Z.B. 2001, "A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology", *Tribol Int*, vol. 34, no. 10, pp. 653-682.
- [3] Dhar, N.R., Ahmed, M.T. & Islam, S. 2007, "An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 5, pp. 748-753.
- [4] Filice, L., Umbrello, D., Beccari, S. & Micari, F. 2006, "On the FE codes capability for tool temperature calculation in machining processes", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 174, no. 1-3, pp. 286-292.
- [5] Ueda, T., Nozaki, R. & Hosokawa, A. 2007, "Temperature Measurement of Cutting Edge in Drilling -Effect of Oil Mist-", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 93-96.
- [6] Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T. & Sheikh, M.A. 2006, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7-8, pp. 782-800.

Detección de Prefallos en Componentes del Tren de Potencia en Generadores de Energía Eléctrica a Partir de Energía Eólica

J. Díaz García⁽¹⁾, J.R. Sáenz Ruiz⁽²⁾, H. Sánchez Sainz⁽³⁾

Departamento Ingeniería Eléctrica, ESII de Cádiz, Dirección Postal c/Chile Nº1, Tel 663125538

⁽¹⁾jose.diaz@uca.es, ⁽²⁾joseramon.saenz@uca.es, ⁽³⁾higinio.sanchez@uca

Resumen

Debido al gran avance que las máquinas de inducción han experimentado en las últimas décadas, investigadores y constructores de las mismas se han visto impulsados a estudiar la detección y diagnóstico de prefallos en dichas máquinas. Asimismo, las nuevas técnicas de mantenimiento proactivo exigen usar herramientas on-line. La intención del presente trabajo es aunar ambas exigencias.

Palabras clave: Aerogeneradores. Motores de inducción. Mantenimiento on-line. Detección de prefallos

1. Introducción

Los combustibles fósiles, en los que se basa nuestro modelo energético actual, son altamente contaminantes y además tienen fecha de caducidad.

Dos son las herramientas fundamentales para resolver los problemas anteriormente reseñados:

- A) Desarrollo de energías alternativas
- B) Un consumo más racional de la energía

El estudio de la energía eólica encuentra justificación tanto en el importante y rápido desarrollo tanto a nivel nacional Figura 1. como internacional Figura 2. como en su avance con respecto a otros tipos de energías Figura 3.

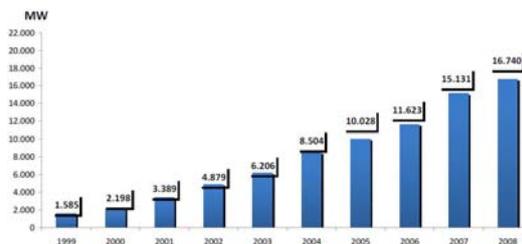


Figura 1. Desarrollo a nivel nacional

Ventajas de la energía eólica: no contaminante, no produce residuos, puede instalarse en espacios no aptos para otras fuentes, puede convivir con otros usos del suelo, (zonas montañosas, granjas marinas, cultivos), genera puestos de trabajo, son rápidas de modificar, cambiar o desmontar.

Puede combinarse con otros tipos de energías: solar, maremotriz, hidrógeno o fotovoltaica.

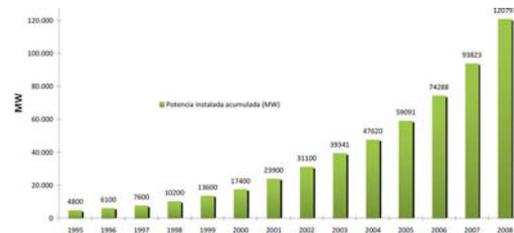


Figura 2. Producción mundial

Permite su instalación en lugares cercanos a los puntos de consumo y es una energía autóctona, lo que permite mayor independencia tanto económica como política de otros países.

Las directrices en España en el futuro más próximo de la energía eólica son:

- I) Permiso de instalación de nuevos parques en donde no existan.
- II) Incremento de la potencia en los parques ya instalados.
- III) Instalación de nuevos parques en la mar.

El tercer punto de la anterior lista de directrices, la producción de energía eólica en la mar, conlleva una mayor dificultad en las labores de mantenimiento debido a: mayores distancia a los centros de mantenimiento, mayores dificultades para los accesos, la dependencia del tiempo climatológico así como el gran inconveniente de los medios necesarios en caso de tener que izar grandes piezas para su cambio.

Por ello deberemos aprender de la experiencia del mantenimiento de los parques ya existentes en tierra y aplicarlos a los aerogeneradores ubicados en los parques marinos; sobre todo en lo concerniente al mantenimiento on-line.

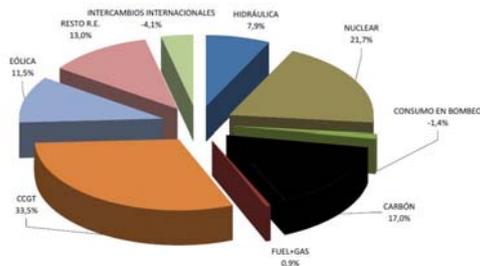


Figura 3. Cobertura de la demanda en 2008

Los objetivos de la futura Tesis son investigar los diferentes componentes de tren de potencia, formado por la multiplicadora y el generador (Figura 4), de los aerogeneradores para identificar la/s posible/s variable/s que puedan ser investigadas y desarrolladas como herramientas para detectar prefallos en el funcionamiento del mismo.

Una vez detectada el prefallo, un sistema SCADA (Control supervisado y adquisición de datos) posibilita su información de forma instantánea al punto de supervisión del parque eólico.

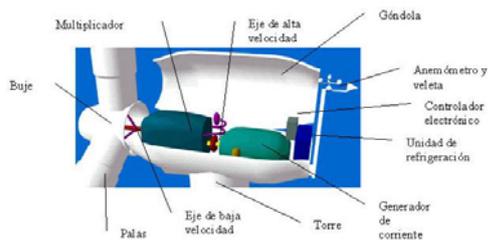


Figura 4. Componentes de un aerogenerador

La justificación de dicha elección viene motivada porque dentro de los diferentes componentes que integran un aerogenerador, el tren de potencia, formado básicamente por la multiplicadora y el generador eléctrico, es de los componentes que sin ser el de mayor índice de averías si es de los que mayor tiempo de parada producen en el aerogenerador [1-4]

1.1 Precedentes del tema

Estudios realizados por “KTH School of Electric Engineering” entre 1997/2004 en diferentes parques eólicos situados en Suecia, Finlandia y Alemania demostraron que el conjunto formado por la multiplicadora y el generador eléctrico tenían el mayor índice de averías (sumando los dos componentes), y el que mayor tiempo de parada producía entre los diferentes componentes del aerogenerador [4].

1.2 Estado actual del tema

En la actualidad se está trabajando en los fallos del tren de potencia, en parte buscando un mejor diseño y en parte buscando una mejor atención en su mantenimiento.

La multiplicadora es un elemento muy fiable y si se realiza correctamente su mantenimiento no suele dar problemas. No obstante habría que intentar dentro de lo posible la estandarización de sus componentes, ya que debido al gran número de fabricantes, así como al aumento constante de tamaño de los aerogeneradores (para conseguir mayor potencia), existe cierta dificultad a la hora de encontrar repuestos, lo que incrementa los tiempos de paradas.

El otro elemento importante del tren de potencia es el generador eléctrico. Es el elegido por este doctorando para localizar una/s variable/s que permita la detección de prefallos.

Los aerogeneradores actuales suelen tener montados en su gran mayoría generadores asíncronos de inducción con rotor Jaula de Ardilla.

Los motores de inducción tienen la ventaja de su fiabilidad, bajo precio y fácil mantenimiento y reparación frente a otros tipos de motores, y a ello deben su gran nivel de utilización, ya que suponen alrededor de un 80% de las máquinas eléctricas existentes en el mercado. [5,6]

En cuanto a la aplicación de dichos motores en la obtención de energía eléctrica no, debe olvidársenos el régimen transitorio al que se ven sometidas dichas unidades como consecuencia de la no uniformidad del viento

1.3 Referencias.

Dos grandes grupos de investigación, entre otros, vienen trabajando en España sobre la localización de averías en máquinas eléctricas rotativas.

- A) Universidad de Tecnología Industrial, Campus de Viesques Gijón
Formado por: Manés Fernández Cabanas, Manuel E. García Melero, Gonzalo A. Alonso Orcajo, José Manuel Cano Rodríguez.
- B) Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
Formados por Manuel Pineda Sánchez, Elías Hurtado Pérez, Rubén Puche Panadero, J. Roger Folch, Pérez Cruz.

Dichos grupos se han centrado en encontrar variables eléctricas que permitan detectar el inicio de algún tipo de fallo y con ello tomar las siguientes medidas: clasificación del tipo de avería, determinación del personal necesario para la reparación, información técnica, localización de repuestos, tiempo estimado de reparación, previsión de medios auxiliares (carretillas, cabrias).

Tres son las variables básicas existentes entre las máquinas eléctricas rotativas estudiadas por

los grupos anteriormente citados y los utilizados en los aerogeneradores:

1ª) Los estudios están realizados sobre motores y no sobre generadores.

2ª) La potencia de los motores, sobre todo los experimentados por la Universidad de Valencia, se circunscribe a motores de pequeña potencia frente a los de gran potencia utilizados en los aerogeneradores, 350kW, 500kW e incluso la tendencia a alcanzar los 2MW.

3) Existe una gran diferencia en cuanto al régimen de trabajo. El funcionamiento de los motores estudiados, sobre todo Gijón, es en régimen permanente y los generadores en los aerogeneradores están sometidos a regímenes transitorios.

2. Metodología Experimental

2.1 Posibles métodos de detección de prefallos on-line.

A) Obtención del espectro de frecuencias de la corriente del estator

Se sabe que la corriente realimentación de la máquina eléctrica es una de las magnitudes que contiene más información sobre el estado de la misma. Por ello está siendo una de las magnitudes más utilizadas, para detectar y diagnosticar posibles fallos en la misma. [5,6]

B) Vector complejo de Park

Permite referir las variables de una máquina trifásica a un sistema de dos ejes en cuadratura. El módulo de la corriente del Vector de Park contiene una dominante en continua y una componente alterna cuya existencia está directamente relacionada con las asimetrías del motor, sirviendo a su vez para detectar cortocircuitos en los devanados del estator. [6,7]

C) Flujo Axial

Debido a las pequeñas imperfecciones en la fase de construcción de los motores, existen pequeños desequilibrios en las corrientes. Todo ello genera la presencia de corrientes de secuencia negativa en el motor, sumando a este efecto el desequilibrio en las corrientes en las cabezas de las bobinas, lo que crea un flujo en el sentido axial del motor. Si colocamos unas bobinas en el extremo del motor de forma concéntrica a su eje, podremos medir el flujo axial y como consecuencia, reconocer prefallos. [5,7]

D) Par electromagnético

El par de un motor de inducción se crea a partir de los enlaces de series de armónicos estatóricos y rotóricos, como consecuencia de dichas interacciones se produce el giro de la máquina.

Mediante el par interno electromagnético que se obtiene a partir de las medidas de las corrientes y tensiones instantáneas de la máquina y su

comparación con los valores patrones podremos detectar desbalanceos. [6]

E) Potencia instantánea

El análisis de la potencia total consumida por el motor, de algunas potencias parciales sirven para detectar prefallos en las máquinas de inducción. [7]

F) Impedancia de secuencia inversa

Todo sistema trifásico desequilibrado puede descomponerse en dos sistemas trifásicos equilibrados de distinta secuencia más un conjunto de fasores con igual fase. Los primeros son llamados sistemas de secuencia directa e inversa y los últimos, sistemas de secuencia cero u homopolar. Las relaciones entre las corrientes y los voltajes de secuencia quedan determinadas por las impedancias de secuencia directa, inversa y cero.

Mientras la impedancia de secuencia directa resulta muy dependiente del estado de carga del motor, la de la secuencia inversa es prácticamente independiente y además es muy susceptible a cortocircuitos en los devanados del estator. Por ello es adecuada para la obtención de prefallo. [5,7]

G) Redes neuronales

Se prepara la red neuronal para que pueda predecir el valor de la corriente de secuencia negativa del motor y extraer conclusiones basadas en reglas que son desarrolladas a partir de conocimientos empíricos. [7]

2.2 Equipos

Lo ideal sería contar al menos con dos generadores similares a los montados en los aerogeneradores, una unidad sana que nos serviría como referencia y otra para provocar averías similares a las que usualmente se suelen producir, pero ello indudablemente sería costoso.

También resultaría complejo contar con los demás medios (sobre todo la reductora) que forman el tren de potencia en el aerogenerador. Por todo ello deberemos realizar simulaciones que nos permitan acercarnos lo más posible a la realidad del aerogenerador.

Como herramienta de simulación utilizaremos MATLAB/SIMULINK. Esta es una herramienta que nos permite la simulación del funcionamiento del sistema aerogenerador en régimen transitorio mediante el correspondiente modelado de todos sus elementos.

Dichas simulaciones las completaremos con ensayos en los laboratorios de la Escuela Superior de Ingeniería así como con los posibles datos que podamos obtener de parques eólicos y de los fabricantes de aerogeneradores.

2.3 Técnicas de diagnóstico

Cada técnica de diagnóstico ante reseñada tiene sus ventajas y desventajas en función del tipo de máquina a estudiar y al tipo de prefallos a localizar. En todos los casos es interesante realizar seguimientos periódicos de las variables a estudiar.

A) Espectros de frecuencias de la corriente de estator

Sirve para detectar barras cortadas en el rotor, cortocircuitos en el estator, excentricidades, desalineación entre ejes.

Inconvenientes. Los cortocircuitos se desarrollan con mucha rapidez. En el caso de las barras rotas y la excentricidad hay que realizar un filtrado de aquellas frecuencias originales que tienen todos los motores, así como de las introducidas por los aparatos de medidas. [5,6]

B) Vector de Park

Sirve para detectar barras cortadas en el rotor, cortocircuitos en el estator y excentricidades.

Inconvenientes. El diagnóstico se ve condicionado por el estado de la carga, funciona mejor cuanto más se acerca a su carga nominal. Para detectar la excentricidad es preciso siempre que el motor cuente con más de dos polos. [6,7]

C) Flujo axial

Sirve para detectar barras cortadas, asimetrías retóricas.

Inconvenientes. Hay quien opina que es un método invasivo. Es necesario investigar más a fondo el efecto que tiene sobre el flujo los aspectos constructivos de la máquina. [5,7]

D) Par electromagnético

Detecta cortocircuitos en el devanado estático y fallos en el sistema de transmisión mecánica.

Inconveniente. Comprobado solo en pequeños motores y un par de polos. [6]

E) Potencia del motor

Detecta fallos del rotor.

Inconveniente. Presenta mayor complejidad y se requieren tanto la medida de las corrientes de estator como de los voltajes aplicados en bornes del motor. [7]

F) Impedancia de secuencia inversa

Sirve para detectar cortocircuitos en el estator.

Inconvenientes. La medida de la impedancia inversa entraña una gran dificultad debido a la influencia que presentan los pequeños errores de cálculo. Los regímenes transitorios térmicos influyen considerablemente en su valor por lo que su medida presenta un cierto grado de dispersión. [5,7]

G Redes Neuronales

Sirve para detectar cortocircuitos en devanados de estator.

Inconvenientes. Requiere monitoreo constante de las variables eléctricas del motor. [7]

4. Conclusiones

Una vez descritas las principales técnicas de la detección de prefallos en máquinas eléctricas rotativas, tendremos que valorar la/s variable/s (nueva e incluso conjuntarla con alguna ya validada ej. vibraciones, temperaturas) que nos servirán para detectar prefallos en el tren de potencia del generador y así poder actuar a tiempo en su pronta reparación.

5. Agradecimientos

A todos los profesores que en este camino me van ayudando y en especial a mis dos tutores.

6. Referencias

- [1] R.Johan, Berttling, LinaMargareta, "Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997/2005". IEEE Transactions on Energy Conversion, v22, n1, March 2007, pp. 167-173.
- [2] J. Ribrant. "Reliability performance and maintenance-A survey of failures in power systems". KTH School of Electrical Engineering 2005/2006.
- [3] R. Drew. "Big offshore wind turbine test well". Engineering Village, Power eng Barrington III, v108, July 2004, pp. 16-18.
- [4] Infield David, "Condition Monitoring of Wind Turbine" Loughborough University – CREST- 205/2007. <http://www.hie.co.uk>.
- [5] Manés Fernández Cabanas, Manuel E. García Melero, Gonzalo A. Alonso Orcajo, José Manuel Cano Rodríguez. Universidad de Gijón. Dpto. de Ingeniería Eléctrica.
- [6] Manuel Pineda Sánchez, Elías Hurtado Pérez, Rubén Puche Panadero, J.Roger Folch, Pérez Cruz, M. Riera Guasp, Universidad Politécnica de Valencia. Dpto. de Ingeniería Eléctrica.
- [7] C. J. Veruchhi, G. G. Acosta, "Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción. IEEE Latin America Transactions, VOL.5, NO.1, March 2007.

Estabilización de sistemas hipercaóticos en órbitas periódicas inestables

M. Prian Rodríguez, M.J. López Sánchez

Departamento de Ingeniería de Sistemas Tecnología Electrónica y Electrónica, 10001, 956 015112,
manuel.prian@uca.es, manueljesus.lopez@uca.es

Resumen

En este trabajo, proponemos un nuevo método de estabilización de sistemas hipercaóticos en torno a órbitas periódicas inestables. El sistema controlado se acerca asintóticamente a orbitas periódicas inestables conocidas previamente o desconocidas, empleando para ello una señal de control continua a trozos. Dicha señal de control será generada mediante el empleo de dos controladores, uno lineal analógico y otro no lineal digital.

1. Introducción

La estabilización de órbitas periódicas inestables (OPIs) embebidas en atractores extraños puede verse en los trabajos pioneros de Ott, Grebogi y Yorke (método OGY) [5] y Pyragas [9] que estabilizan OPIs previamente conocidas. Los métodos para estabilizar sistemas caóticos en OPIs desconocidas pueden verse en los trabajos de González [1], M. A. Matías y J. Güémez [4], Ushio y Yamamoto [11], Yu-Ping Tian y Xinghuo Yu [10]. Excepto el método de control en tiempo continuo de Pyragas y el método en tiempo discreto OGY, el resto de los reseñados más arriba son difíciles de aplicar de forma práctica en sistemas caóticos y más aun en sistemas hipercaóticos. En [2], [6], [7], [8], [12], [13] pueden verse otros métodos de control del caos en OPIs, basados en control retroalimentado cuya implementación práctica es de relativa sencillez.

2. Estabilización de hipercaos en una órbita periódica inestable.

Se considera un sistema de control no lineal n -dimensional en tiempo continuo cuyas ecuaciones de estado son:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

Con $\mathbf{x}(t) \in U$ ($U \subset \mathbb{R}^n$), $\mathbf{u}(t) \in V$ ($V \subset \mathbb{R}^p$) y U, V son respectivamente conjuntos abiertos en \mathbb{R}^n y \mathbb{R}^p donde $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ es un vector de estado, $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T$ es el vector de entradas de control, $\mathbf{F}: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ con $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ es un campo vectorial y \mathbf{B} es una matriz de dimensión ($n \times p$). Nosotros consideraremos para simplificar que el vector de salida del sistema de control (1) es igual al

vector de estado y asumimos que el sistema (1) libre de control presenta comportamiento caótico para unas determinadas condiciones iniciales.

3. Método de control.

Para estabilizar el sistema de control (1) en torno a una OPI inherente al caos utilizaremos dos leyes de control retroalimentado, una en tiempo continuo y otra en tiempo discreto. Damos a continuación las definiciones necesarias para la síntesis del método de control propuesto.

Definición 1: Sea la hipersuperficie que viene dada por $\Sigma_p = \{\mathbf{x} \in Q : S(\mathbf{x}) = 0\}$, donde Q es un conjunto abierto de \mathbb{R}^n y $S: Q \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de clase C^k , $k \geq 1$ tal que $\nabla S(\mathbf{x}) \neq 0$ para todo $\mathbf{x} \in \Sigma_p$ y que es transversal al campo vectorial \mathbf{F} de (1) en lazo cerrado es decir, $\langle \nabla(S(\mathbf{x})), \mathbf{F}(\mathbf{x}) \rangle \neq 0$ para todo $\mathbf{x} \in \Sigma_p$.

Definición 2: La hipersuperficie Σ_p divide el espacio de estado de (1) en lazo cerrado en dos regiones, expresadas por los siguientes conjuntos: $\Sigma_- = \{\mathbf{x}(t) \in U : S(\mathbf{x}(t)) < 0\}$ y $\Sigma_+ = \{\mathbf{x}(t) \in U : S(\mathbf{x}(t)) > 0\}$, donde $\Sigma_- \cup \Sigma_p \cup \Sigma_+ \subset \mathbb{R}^n$. Cuando la trayectoria de $\mathbf{x}(t)$ viaje por el espacio de estado en el sentido de Σ_- hacia Σ_+ y se verifique en ciertos instantes de evento $t = \tau_j$ ($j = 1, 2, \dots$) que $S(\mathbf{x}(\tau_j)) = 0$, nosotros diremos que se ha cumplido una condición de evento ascendente (CEA). Denotaremos la citada CEA por $S(\mathbf{x}(\tau_j))^\uparrow = 0$ ($j = 1, 2, \dots$). De forma análoga

se define la condición de evento descendente (CED) que viene expresada por $S(\mathbf{x}(\tau_j))^\downarrow = 0$. Al subíndice j lo denominaremos de impactos, por indicar el orden en la secuencias de impactos de la trayectoria de (1) en lazo cerrado con la hipersuperficie Σ_p .

Definición 3: El intervalo de tiempo $\Delta\tau$, dado por $\Delta\tau = \tau_{j+1} - \tau_j$ es usualmente llamado tiempo de vuelo o intervalo de tiempo del primer retorno y es el tiempo que tarda la trayectoria de $\mathbf{x}(t)$ entre dos impactos consecutivos con la hipersuperficie Σ_p .

Definición 4: Los instantes de evento retardados $t = t_j$ ($j = 1, 2, \dots$) son los tiempos que verifican que $t_j = \tau_j + \delta$ siendo δ un intervalo de tiempo constante que denominaremos de retardo y que debe cumplir $\delta < \Delta\tau$.

Definición 5: Se considera la ley de control en tiempo discreto $\mathbf{v}(\tau_j) = \mathbf{z}(\tau_j) - \mathbf{B}^T \mathbf{x}(\tau_j)$ definida para los sucesivos impactos j ($j = 1, 2, \dots$) de la trayectoria del sistema de control (1) en lazo cerrado con la hipersuperficie Σ_p , siendo $\mathbf{z}(\tau_j)$ la salida del filtro no lineal en tiempo discreto:

$$\mathbf{z}(\tau_j) = \mathbf{B}^T \mathbf{x}(\tau_j) + \mathbf{A} \begin{pmatrix} \sin(z_1(\tau_{j-1}) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(\tau_j)) \\ \vdots \\ \sin(z_p(\tau_{j-1}) - \mathbf{C}_p \mathbf{x}(\tau_j)) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde, $\mathbf{z}(\tau_j) \in \mathbb{R}^p$, $\mathbf{v}(\tau_j) \in \mathbb{R}^p$, $\mathbf{x}(\tau_j)$ es el vector de estado de la planta en el instante de evento $t = \tau_j$ ($j = 1, 2, \dots$), \mathbf{B}^T es la matriz transpuesta de \mathbf{B} , \mathbf{C}_i ($i = 1, 2, \dots, p$) es una matriz de dimensión $(1 \times n)$ cuya fila es igual a la fila i -ésima de \mathbf{B}^T y $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_p)$ es una matriz diagonal de parámetros constantes.

Definición 6: Se considera la ley de control analógico $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{e}(t)$ con $\dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{e}(t)$ que es integrada en los intervalos de tiempo $t_j \leq t < t_{j+1}$ ($j = 1, 2, \dots$) con la condición inicial en los instantes de evento retardados $t = t_j$ ($j = 1, 2, \dots$) dada por $\mathbf{e}(t_j) = \mathbf{v}(\tau_j)$, donde $\mathbf{e}(t) \in V$ y $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_p)$ es una matriz diagonal de parámetros constantes. La ley de control analógico $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{e}(t)$ es según la

presente definición una señal de control continua a trozos de la forma $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K} \exp(-\mathbf{K}(t - t_j)) \mathbf{v}(\tau_j)$ para $t_j \leq t < t_{j+1}$ ($j = 1, 2, \dots$) y que presenta una discontinuidad de salto finito en los instantes de evento retardado $t = t_j$ ($j = 1, 2, \dots$) dado por $\mathbf{u}(t_j) = \mathbf{K}\mathbf{v}(\tau_j)$.

Describiremos ahora el método de control para estabilizar el caos, con ayuda del diagrama de bloques de la figura 1.

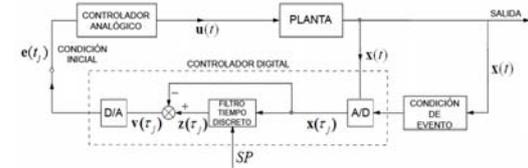


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control (1) en lazo cerrado.

En el se observan los bloques del detector de condición de evento, controlador no lineal digital, controlador lineal analógico y planta. Supongamos elegida una cualquiera de las dos condiciones de evento posibles CEA o CED y que esta se verifica en los instantes de evento $t = \tau_j$ ($j = 1, 2, \dots$), en ese instante, el detector de condición de evento activa el convertidor analógico-digital (A/D) para obtener la señal en tiempo discreto $\mathbf{x}(\tau_j)$, esta señal será empleada por el controlador digital no lineal para calcular la ley de control en tiempo discreto $\mathbf{v}(\tau_j)$ descrita en la definición 5. En los instantes de evento retardados $t = t_j$ ($j = 1, 2, \dots$) están disponibles las condiciones iniciales $\mathbf{e}(t_j) = \mathbf{v}(\tau_j)$ para el controlador analógico que generará la ley de control continua a trozos $\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{e}(t)$ de la definición 6. La ley de control analógico $\mathbf{u}(t)$ es sumada a la planta a través de su entrada de control, obteniéndose $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{e}(t)$. El tiempo de retardo δ de la definición (4) es ligeramente mayor que el tiempo empleado por el controlador no lineal digital en la síntesis de la condición inicial más el tiempo empleado en la introducción de la condición inicial en el controlador lineal analógico. Este tiempo debe ser $\delta < \Delta\tau$ para el correcto funcionamiento del sistema.

El sistema de control (1) en lazo cerrado puede ser descrito mediante las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3)$$

$$S(\mathbf{x}(\tau_j))^\uparrow = 0 \quad \text{o} \quad S(\mathbf{x}(\tau_j))^\downarrow = 0, \quad (4)$$

($j = 1, 2, \dots$)

$$\mathbf{z}(\tau_j) = \mathbf{B}^T \mathbf{x}(\tau_j) + \mathbf{A} \begin{pmatrix} \sin(z_1(\tau_{j-1}) - \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(\tau_j)) \\ \vdots \\ \sin(z_p(\tau_{j-1}) - \mathbf{C}_p \mathbf{x}(\tau_j)) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}(\tau_j) = \mathbf{z}(\tau_j) - \mathbf{B}^T \mathbf{x}(\tau_j)$$

($j = 1, 2, \dots$)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{e}(t) \\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}\mathbf{e}(t) \end{cases} \begin{cases} t_j \leq t < t_{j+1} \\ j = 1, 2, \dots \\ \mathbf{e}(t_j) = \mathbf{v}(\tau_j) \end{cases} \quad (6)$$

Donde, (3) representa la planta con la ley de control aplicada, (4) expresa la condición de evento elegida, (5) es la ley de control en tiempo discreto y (6) la ley de control analógico.

4. Resultados de simulación numérica

Como ejemplo de aplicación del método de control en la búsqueda de una OPI desconocida embebida en un atractor hipercaótico, se ha implementado el controlador en el sistema hipercaótico de Lorenz. Se ha aplicado el método para estabilizar una órbita periódica inestable de período uno. Se ha supuesto la ausencia de ruido de medida con objeto de una mayor nitidez en la representación de la órbita estabilizada. Para integrar numéricamente el sistema de control se ha empleado un sencillo integrador de Euler directo con paso de integración Δt fijo y se ha empleado un tiempo de retardo δ de $10\Delta t$. Se ha realizado control escalar, habiéndose ajustado los coeficientes constantes a_2 y k_2 experimentalmente. Si queremos que el sistema de control converja hacia una OPI predeterminada se deberá dar a la entrada de control SP el valor constante correspondiente al que tendría la variable filtrada en el caso de que el sistema de control evolucionará en torno a la OPI objetivo y se haría la sustitución $x_j = SP$, es decir, la entrada del filtro pasa a ser constante e igual a SP . El sistema hipercaótico de Lorenz [14], con la ley de control analógico en la forma escalar $u_2(t) = k_2 e_2(t)$ aplicada en el lado derecho de la segunda ecuación, queda expresado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a(x_2(t) - x_1(t)) + x_4(t) \\ \dot{x}_2(t) = cx_1(t) - x_1(t)x_3(t) - x_2(t) + u_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = -bx_3(t) + x_1(t)x_2(t) \\ \dot{x}_4(t) = -x_2(t)x_3(t) + rx_4(t) \end{cases} \quad (7)$$

Los valores de los parámetros utilizados en la simulación son: $a = 10$, $b = 8/3$, $c = 28$, $r = -1$ y las condiciones iniciales empleadas: $x_1(0) = -20$; $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 15$. Con las condiciones anteriores (7) presenta comportamiento hipercaótico, suponiendo que $u_2(t) \equiv 0$. El paso de integración empleado en la simulación ha sido $\Delta t = 10^{-4} s$, la condición de evento empleada ha sido una CEA de la forma $(x_{4,j})^\uparrow = 0$. Se han tomado para los parámetros de control los siguientes valores: $a_2 = 1.9$ y $k_2 = 176s^{-1}$.

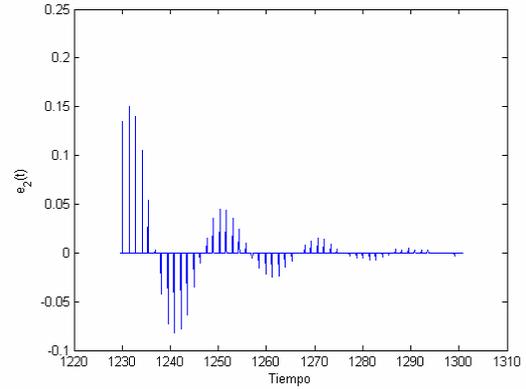


Figura 2. Diagrama temporal de la señal de control $e3(t)$ aplicada al sistema hipercaótico de Lorenz, desde que se aplica el control hasta que éste evoluciona en torno a una OPI.

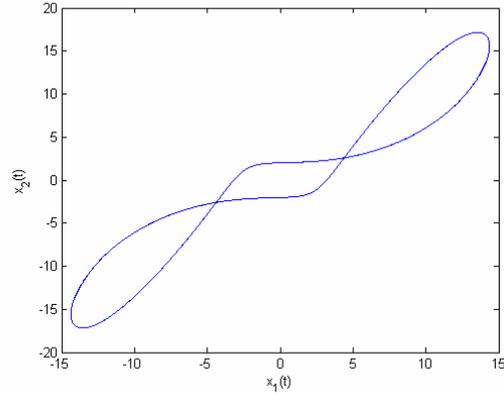


Figura 3. Retrato de fases del sistema hipercaótico de Lorenz estabilizado en torno a la OPI correspondiente al instante de aplicación del control de la figura 2.

5. Conclusiones

Se ha presentado un nuevo método de control de hipercaos que utiliza dos controladores, uno lineal analógico y otro digital no lineal, que estabiliza sistemas hipercaóticos entorno a OPIs conocidas o desconocidas de período uno o mayor. Se ha presentado un ejemplo de

simulación numérica con aplicación del método de control al sistema hipercaótico de Lorenz. Se observa en el sistema controlado como la señal de control disminuye con decaimiento exponencial a medida que la respuesta del sistema se acerca a una OPI. Por la falta de espacio disponible, solo hemos podido mostrar un caso de control de hipercaos, de los numerosos efectuados.

Algunos de los resultados obtenidos hasta el momento del proyecto de tesis "Contribución al control de estados de equilibrio inestables en sistemas dinámicos: Aplicación al control de sistemas caóticos", son los siguientes: Un análisis de estabilidad teórico para dos soluciones particulares de un sistema de control de caos e hipercaos propuesto en [6] y [7]. Algoritmos que facilitan la aplicación de dichos métodos en sistemas caóticos e hipercaóticos. Estudios numéricos de estabilidad de diversos sistemas de control de caos e hipercaos empleando los exponentes de Lyapunov con objeto de confirmar la hipótesis de estabilidad asintótica hacia una OPI del sistema controlado. Eliminación de los efectos negativos que tienen en el control los ruidos de medida mediante filtros o modelando algunos vectores de campo del sistema caótico. Simulación mediante Electronic Workbench, de un sistema de control del caos en OPIs, cuyos resultados satisfactorios indican la viabilidad práctica del mismo. En cuanto a sistema de control continuo para estabilizar el caos en OPIs se han ideado algunos controladores y realizado simulaciones de los sistemas controlados. También se ha realizado control de equilibrios estáticos [3], [6], así como, control del caos en órbitas caóticas (sincronización).

Algunas líneas de continuidad inmediata son: Un análisis de estabilidad para los casos de sistemas de control en tiempo continuo del caos y otro (aparte de los casos particulares ya estudiados) para el sistema de control propuesto en el presente trabajo. La implementación práctica de un controlador empleando componentes discretos y/o utilizando un dispositivo microcontrolador.

6. Referencias

- R. González López, Estudio de Osciladores Electrónicos Autónomos: Aplicación a un Oscilador de Puente de Wien Modificado, *Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz*. 1998
- M.J. Lopez, M. Prian and F.M. Verdulla, "Chaos Control Method". *Internal Report Nov. 2006. Dpto. de Ing. de sistemas y Automática. Universidad de Cádiz*.
- M.J. López, F.M. Verdulla and M. Prian, "Chaos control based on nonlinear state feedback and linear H-infinite controller synthesis". *WSEAS Transactions and systems, Issue 1*, vol. 6, pp. 68-75, ISSN 1109-2777, 2007.
- M.A. Matias and J. Güemez, "Chaos suppression in flows using proportional pulses in the system variables" *Physical Review E*, volume 54, Number 1 pp. 198-209, 1996.
- E. Ott, C. Grebogi and J.A. Yorke, "Controlling chaos", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, no. 11, pp. 1196, 1199, 1990.
- M. Prian, R. González, M. Sánchez, E. Romero, J.L. Rojas. "Sistema de control automático para la estabilización de órbitas periódicas inestables en sistemas no lineales". *Actas de las IV jornadas andaluzas en tecnología de la información. Cádiz*. 1999.
- M. Prian, M.L. López, "Aproximación al control de sistemas dinámicos complejos", *Memoria de doctorado. Evaluación Global. Universidad de Cádiz*. 2005.
- M. Prian, M.J. López, F.M. Verdulla, "Control del caos vía controlador híbrido", *pendiente de publicación*. 2009
- K. Pyragas, "Continuous control of chaos self-controlling feedback", *Phys Lett.* vol. A no. 170 pp. 421-428, 1992
- Yu-ping Tian, Xinghuo Yu, "Time delayed impulsive stabilization of unstable periodic orbits in chaotic hybrid systems." *Chaos Control. Theory and applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York. ISBN 3-540-40405-8. 2003.
- T. Ushio and S. Yamamoto, "Prediction-based control of chaos." *Physics Letters A*, 264 (1999) 30-35.
- F.M. Verdulla, M.J. López y M. Prian, "A pulse control method for chaotic". *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 7, No 1, pp 1-11. 2009.
- F.M. Verdulla, M.J. López y M. Prian, "Control de Sistemas caóticos basado en condición de evento variable ajustada a la dinámica del proceso". *pendiente de publicación*. 2009.
- Jinag Xu, Guoling Cai, Song Zheng. "Adaptive Synchronization for an Uncertain New Hyperchaotic Lorenz System". ISSN 1749-3889, *International Journal of Nonlinear Science*. Vol.1, pp.117-123, 2009.

Estudio de la Evolución del Desgaste de Herramientas en el Fresado Periférico de Alta Velocidad de la Aleación UNS A92024-T3

J. Salguero Gómez⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Industrial e Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Avda. Ramón Puyol s/n, 11202, Algeciras. 956 015 123, jorge.salguero@uca.es

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería, c/ Chile s/n, 11002, Cádiz.

Resumen

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en el estudio de la vida útil de herramientas de corte en el proceso de fresado periférico de alta velocidad de la aleación UNS A92024-T3 (Al-Cu). Para ello se ha evaluado el desgaste en función del tiempo de mecanizado, haciendo uso de técnicas de microscopía electrónica.

Los resultados obtenidos marcan un claro límite de trabajo en torno a las 4 horas de trabajo, a partir de las cuales, la herramienta sufre variaciones geométricas importantes. Por otro lado, la aparición de una fina capa de aluminio adherida al canal de fluencia parece favorecer la evacuación de la viruta y retardar el deterioro en esta zona, mientras que el filo de corte parece debilitarse debido a una disminución del porcentaje de Co en esta zona.

1. Introducción

Actualmente, el mercado de las herramientas de corte es considerado como uno de los más sólidos dentro del campo industrial, con un volumen de negocio en Europa cercano a los 6 billones de € en 2008. Además, se asume que en torno al 4% del coste final de una pieza mecanizada es debido al coste de las herramientas necesarias para producirla [1]. Cabe destacar asimismo que, en el campo del mecanizado, alrededor del 10% de las herramientas de corte son consumidas por el sector aeroespacial [2].

En este contexto, se entiende que cualquier aumento en la vida de las mismas, se traduce en una importante reducción de gastos en la fabricación de piezas. Es por ello que, dentro de la Tesis de título “*Análisis, Evaluación y Propuestas de Mejora del Rendimiento del Mecanizado de Alta Velocidad de Aleaciones de Aluminio de Interés en la Industria Aeronáutica*”, la optimización del rendimiento de herramientas tenga un importante peso.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del desgaste de herramientas en un proceso de alto valor añadido en la industria aeroespacial, el Fresado Periférico de Alta Velocidad (FPAV) de planchas de la aleación UNS A92024-T3 (Al-Cu), de amplio uso en la fabricación de elementos aeronáuticos.

Dicho estudio se ha llevado a cabo considerando puntos de vista microestructurales y

morfológicos, y su desarrollo se ha apoyado en estudios precedentes en sistemas similares [3,4].

2. Metodología Experimental

Se han llevado a cabo ensayos de FPAV, con velocidad de husillo de 19.800 rpm y avance de 1,44 m/min en un centro de mecanizado Créno Aero, Figura 1.a). Este proceso se ha aplicado sobre conjuntos de chapas de 1200x3200, con espesor total no superior a 10 mm, Figura 1.b). Dichos ensayos se han programado en un rango temporal desde 0 hasta 10 horas, retirando la herramienta usada cada hora acumulada de trabajo, hasta un total de 10 horas de mecanizado.



Figura 1. a) CMAV Créno Aero. b) Detalle de la disposición de las planchas.

Por otro lado, y con objeto de reducir el empleo de lubricantes dentro de una línea de mecanizado de bajo impacto medioambiental [5], los ensayos se han efectuado con un sistema de atmósfera oleica por MQL (de Minimum Quantity Lubrication). Como herramienta de corte se han utilizado fresas frontales de metal

duro integral (WC-10%Co) de dos labios y hélice de 30°, Figura 2.

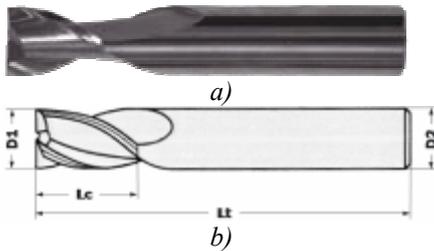


Figura 2. a) Fresa frontal. b) $D1=D2=10\text{ mm}$, $Lc=16\text{ mm}$, $Lt=60\text{ mm}$.

Una vez realizados los ensayos, las herramientas han sido cuidadosamente limpiadas de cualquier residuo oleico y sometidas a un estudio mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM, de Scanning Electron Microscopy) y espectroscopía de Energía dispersiva (EDS, de Energy Dispersive Spectroscopy). Para este propósito se ha empleado un microscopio electrónico de barrido Philips Quanta 200, equipado con un sistema EDAX de microanálisis.

3. Resultados y Discusión

Uno de los principales mecanismos que participan en el proceso de desgaste que se da en las herramientas de WC-Co cuando mecanizan aleaciones de aluminio viene dado por el denominado “fenómeno de adhesión secundaria o indirecta” [4,6-7]. De acuerdo con este mecanismo, en una primera etapa se incorpora material de la pieza al filo de corte de la herramienta, dando origen al llamado “filo adherido” (BUE, Built Up Edge), y/o a la cara de desprendimiento, dando lugar a la “capa adherida” (BUL, Built Up Layer). En ambos casos, se modifican las propiedades geométricas y mecánicas de la herramienta, lo que se corresponde con el concepto más actual de desgaste [3,8], que contempla cualquier alteración de sus condiciones iniciales, Figura 3.

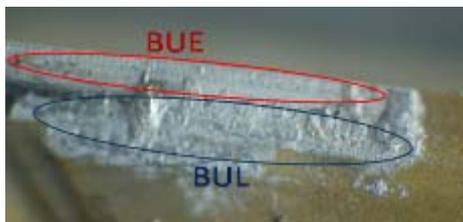


Figura 3. Adhesión de material en una plaquita de torneado.

Mediante el análisis SEM de las herramientas, se ha detectado la aparición de ambos efectos en las fresas ensayadas. En las Figuras 4 y 5 se muestra la evolución del desgaste de las mismas

en función del tiempo de trabajo, mientras que en la Figura 6 se puede observar el desgaste sufrido por la herramienta que ha mecanizado durante siete horas, que ha sufrido unas variaciones geométricas muy severas.

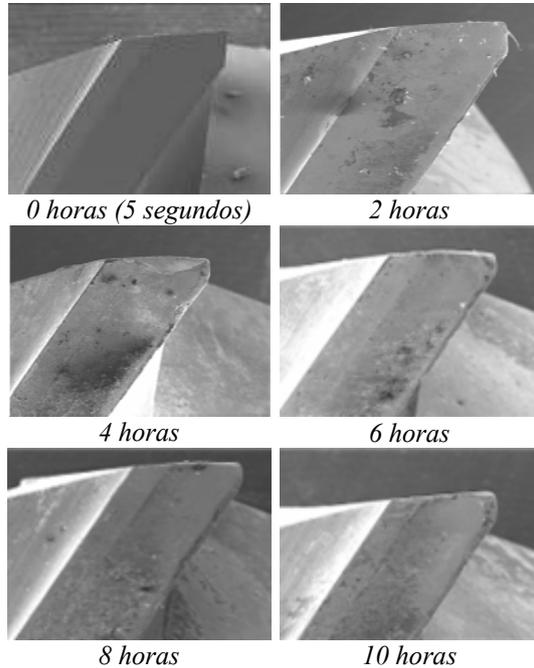


Figura 4. Micrografías electrónicas (100x) del filo cercano a la punta de la herramienta en función del tiempo de mecanizado, vista desde la cara de incidencia.

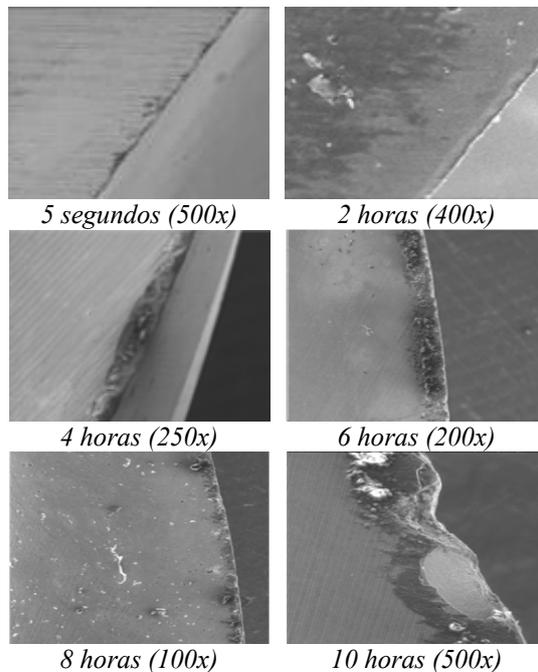


Figura 5. Micrografías electrónicas del filo de corte en función del tiempo de mecanizado, vista desde la cara de desprendimiento.

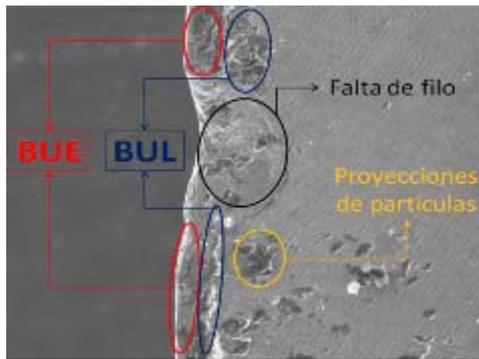


Figura 6. Micrografía SEM (300x) del filo visto desde el canal de fluencia de la fresa que ha mecanizado durante 7 horas.

Estas observaciones no suponen en sí nada novedoso, y ya han sido efectuadas en trabajos previos, desarrollados en otros procesos de mecanizado, y en distintas aleaciones de aluminio [3-4,6-7]. No obstante, cabe destacar una importante diferencia con respecto a los resultados de estos trabajos. Al parecer, en las fresas ensayadas, se da un mantenimiento del estado de la capa adherida sobre la cara de desprendimiento, que actúa protegiendo a la misma del rozamiento de la viruta, mientras que se observa un más que acusado deterioro del filo con el transcurso del tiempo de mecanizado.

En concreto, se han detectado señales visibles de pérdida de filo especialmente críticas a partir de las cuatro horas de trabajo, además de otros efectos como el de la incorporación de micro partículas de viruta en zonas más alejadas, con el consiguiente peligro de aparición de mecanismos de desgaste abrasivos.

No obstante, es preciso hacer constar que estos resultados han sido obtenidos con velocidades de corte en un factor 6 veces menor que las empleadas en el presente trabajo. En efecto, en [3] se pone de manifiesto la existencia de estos dos efectos, BUL y BUE, en el torneado en seco de esta misma aleación con herramientas de metal duro recubiertas con TiN.

En dicho trabajo se identifican diferencias composicionales entre el material adherido en el filo y en la cara de desprendimiento. En efecto, mientras que el BUE presenta la composición de la aleación, en el BUL se detectan valores composicionales propios del aluminio puro. De esta forma se establecen diferencias entre los mecanismos de formación [4], sugiriéndose un modelo termomecánico para la formación del BUL y uno de adhesión mecánica para el BUE.

Esta diferencia composicional ha sido asimismo detectada mediante el análisis EDS del material adherido a las fresas, lo que lleva a pensar que en el proceso FPAV se dan unos modelos de formación del BUL y BUE similares a los del torneado a menor velocidad, Figura 7.

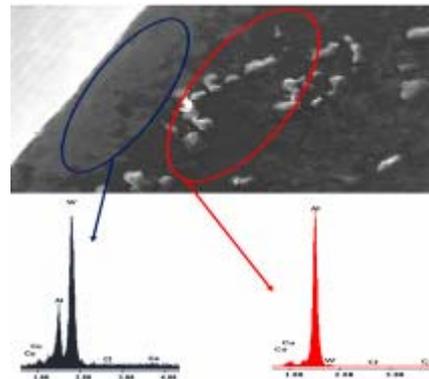


Figura 7. Micrografía SEM (400x) del filo visto desde la cara de incidencia de una fresa que ha mecanizado durante 4 horas, con los EDS asociados al BUE (izquierda) y BUL (derecha).

Como se puede observar, el espectro EDS correspondiente al BUE es similar al de la aleación, considerándose su formación debida a efecto de adhesión mecánica. La presencia de W, material de la herramienta, se asocia al ínfimo espesor de material adherido (efecto denominado “capa transparente”). Por su parte, el espectro correspondiente al BUL indica un notable descenso en aleantes, lo que está en buen acuerdo con lo expuesto anteriormente. Este hecho hace pensar que se sigue produciendo un reblandecimiento de la matriz de aluminio, que es aplastada sobre la cara de desprendimiento para formar el BUL.

Por otro lado, y con objeto de analizar el grave deterioro del filo de corte, comentado anteriormente, se ha llevado a cabo un estudio de la composición de la herramienta en las zonas más cercanas al mismo. Para ello se ha comparado la relación entre las intensidades de los picos correspondientes a las líneas principales de Co y W en los espectros EDS, adquiridos linealmente en zonas cercanas al filo, Figura 8.

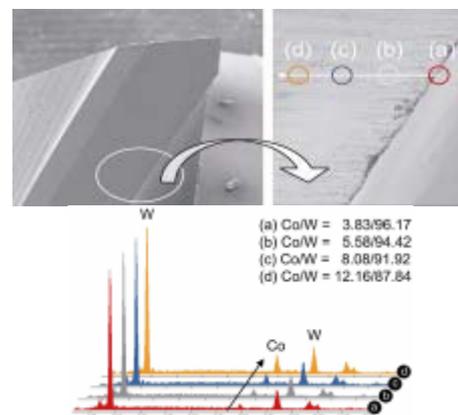


Figura 7. Espectros adquiridos en las zonas indicadas sobre una herramienta tras 5 segundos de FPAV.

A medida que se va realizando una mayor aproximación al filo de corte, existe un considerable descenso de la relación Co/W , lo que forzosamente indica una disminución del porcentaje de Co en la composición superficial de la herramienta, decreciendo asimismo la resistencia mecánica y debilitando el filo de corte de la herramienta.

Este debilitamiento local, sumado a la propia inestabilidad mecánica del BUE, acelera la rotura del filo por medio de la formación y desprendimiento cíclicos del material adherido, arrastrando consigo partículas de la herramienta y originando su deterioro o desgaste.

4. Conclusiones

El principal causante del deterioro de las herramientas de WC-Co en el proceso FPAV de la aleación UNS A92024-T3 (Al-Cu), es el mecanismo de desgaste por adhesión secundaria o indirecta, estimándose que la vida media de las herramientas, con los parámetros de corte establecidos, se encuentra en torno a las 4 horas de trabajo.

El experimental ha demostrado que éste viene favorecido por una distribución irregular del cobalto en la herramienta, que puede estar asociado al proceso de rectificado al que es sometida la herramienta durante su fabricación.

El análisis mediante microscopía electrónica ha puesto de manifiesto un acusado mecanismo de adhesión (BUL-BUE) en todas y cada una de las herramientas. Al parecer, el aluminio adherido a la herramienta crea una capa que protege la cara de desprendimiento y canal fluencia de la fresa, facilitando la evacuación de la viruta, favorecido por una distribución de cobalto homogénea, de entorno al 10%.

En cambio, la cara de incidencia presenta una disposición muy elevada a la adhesión de material, lo que puede venir justificado por la disminución del porcentaje de cobalto conforme se acerca al filo de corte, siendo éste bastante débil por el mismo motivo.

5. Líneas futuras de investigación

Como se ha comentado anteriormente, los resultados mostrados en este trabajo provienen de una de las primeras etapas de una investigación mucho más amplia, en parte centrada en la optimización del rendimiento de herramientas de corte.

Existen varias líneas de acción inmediatas para mejorar la vida de las herramientas y que minimicen, en lo posible, su desgaste [8], como es el diseño geométrico y el material de las

mismas (incluyendo recubrimientos y material del núcleo).

En este último sentido, y atendiendo al principio de parsimonia o “navaja de Ockham”, que dicta que en igualdad de condiciones, la solución más sencilla es probablemente la correcta, una de las fases de la Tesis va a estar centrada en el estudio de la restauración de las propiedades óptimas del filo de corte.

Para ello existen dos tipos de tratamientos térmicos de comprobada fiabilidad, el criogenizado y el temple [9], que consiguen modificaciones microestructurales y aumentos de dureza generalizados.

No obstante, también se ha considerado el estudio de tratamientos térmicos de temple aplicados de forma localizada en el filo por medio de técnicas láser, a fin de seguir conservando las propiedades beneficiosas de la capa adherida en el canal de fluencia.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía y por la empresa Airbus Military.

7. Referencias

- [1] European Cutting Tools Association (ECTA), www.ecta-tools.org/industry_customers.php. (Último acceso: 10/11/09).
- [2] W. Sengebusch, *Europe, economic report & Outlook*, Proc. World Cutting Tool Conference, San Sebastián, 2007.
- [3] J.M. Sánchez, M.A. Sebastián, J.M. González, M.S. Carrilero y M. Marcos, *Mat. Sci. Forum* 480-481 (2005) 181-186.
- [4] M.S. Carrilero, R. Bienvenido, J.M. Sánchez, A. González y M. Marcos, *Int. J. of Mach. Tools and Manuf.* 42 (2002) 215-220.
- [5] J.F. Kelly, *J. of Mat. Proc. Tech.* 120 (1-3) (2002) 327-334.
- [6] J.M. Sánchez, *Análisis paramétrico del mecanizado de aleaciones de aluminio. Relación con la topografía superficial de piezas mecanizadas*. Tesis Doctoral, UNED, Madrid (2004).
- [7] M. Nouari, G. List, F. Girot y D. Coupard, *Wear* 255 (7-12) (2003) 1359-1368.
- [8] M.A. Sebastián y F. Faura, *Rev. Iber. de Ing. Mec.* 1 (1997) 81-93.
- [9] D. Thakur, B. Ramamoorthy y L. Vijayaraghavan, *Mat. Letters* 62 (2008) 4403-4406.

Estudio del efecto de la vibración producida por el movimiento de las campanas de la Catedral de Cádiz

J.J. González-Outón Coca⁽¹⁾, M. Salvá Cárdenas⁽²⁾

⁽¹⁾Urbanización El Retortillo, local 15. 11.130 - Chiclana. +34 856 11 53 11. outon@estudio15.es

⁽²⁾Departamento de máquinas y motores térmicos. Polígono Río San Pedro, edificio CASEM. Puerto Real

Resumen

Las campanas son instrumentos musicales de percusión, pero son también mecanismos dinámicos que producen reacciones sobre sus apoyos y estructuras sometidas a esfuerzos considerables. Hasta ahora el conocimiento sobre el efecto que produce el movimiento de las campanas en la estructura de un campanario se ha ido transmitiendo de generación en generación principalmente, siendo muy escasos los estudios científicos sobre el tema.

Este proyecto analiza las reacciones producidas en los apoyos de las campanas de la Torre de Poniente de la Catedral de Cádiz, así como los esfuerzos a los que se somete a la propia estructura de las campanas al moverse.

1. Introducción

La Catedral de Cádiz, declarada Bien de Interés Cultural (BIC) en el año 2000 [1], está afectada por el llamado “mal de la piedra”, por lo que se entiende que cualquier acción que pueda afectar a su estabilidad debe ser previamente estudiada y analizada. Han sido numerosas las reformas y restauraciones que se han realizado en los campanarios, las campanas, y los mecanismos de accionamiento de éstas en los últimos años. La última, en la Torre de Levante hace unos meses, con el fin de restaurar las campanas más deterioradas y modificar su mecanismo de accionamiento. A partir de ahora las campanas van a voltear, en lugar de bandear, como ha sido lo habitual.

Este documento es un resumen de un proyecto cuyo objetivo era analizar las acciones dinámicas de las campanas sobre sus apoyos.

2. Modos de actuación de las campanas

Los tres sistemas más conocidos para hacer sonar campanas que impliquen la oscilación de éstas son el Centroeuropeo, el Inglés, y el Español. En el primero de ellos las campanas oscilan un determinado ángulo respecto de su posición de equilibrio, no llegando nunca a alcanzar los 180° respecto de la posición inicial con la boca de la campana hacia abajo. En el sistema Inglés se completan círculos completos, alternando el sentido de rotación en cada ciclo. Ambos son sistemas muy desequilibrados y requieren de unas estructuras específicamente diseñadas para el soporte de las campanas en las torres. Contrariamente, en el sistema Español, un contrapeso proporciona un gran equilibrio al

conjunto, y las campanas, ancladas directamente en el campanario, rotan continuamente en la misma dirección.



Figura 1. Sistema centroeuropeo (izquierda), sistema inglés (centro), y Sistema español (derecha)

Tabla I. Ángulos de oscilación habituales

Sistema	País	Ángulo de oscilación
Centroeuropeo	Alemania	54-80°
	Otros países europeos	80-110°
	EEUU	50-160°
Español	Todos los países	Círculo completo
Inglés	Todos los países	Círculo completo

3. Estudio dinámico de las campanas

Según el Dr. Salvador Ivorra [2], el volteo de las campanas produce en sus apoyos unas fuerzas horizontales y verticales variables en el tiempo, cuyos valores aproximados se obtienen a partir de las fórmulas siguientes:

$$H(t) = M \cdot a \cdot [(\dot{\phi})^2 \cdot \sin \phi(t) - \ddot{\phi} \cdot \cos \phi(t)] \quad (1)$$

$$V(t) = -M \cdot g - M \cdot a \cdot [(\dot{\phi})^2 \cdot \cos \phi(t) + \ddot{\phi} \cdot \sin \phi(t)] \quad (2)$$

Donde:

- M es la suma de las masas de la campana y el yugo,
- a es la distancia entre el centro de gravedad de la campana (G1) y el eje de rotación (C1),
- g es la aceleración debida a la gravedad,
- ϕ es el ángulo de giro de la campana respecto a la vertical que pasa por el eje de rotación (C1), y que queda definido por la ecuación:

$$\phi(t) = 2 \cdot \arccos \left[\beta \cdot \operatorname{sn} \left(\sqrt{\frac{g \cdot M \cdot a}{I_b}} \cdot t \right) \right] \quad (3)$$

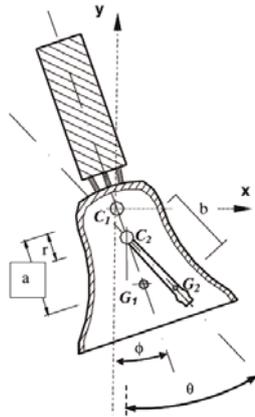


Figura 2. Modelo simplificado de una campana

Donde:

- t es el tiempo,
- I_b es el momento polar de inercia de la campana, $I_b = M \cdot a^2$,
- sn es la Función Jacobiana Elíptica,
- β es una constante que depende de las condiciones iniciales y que se define con la ecuación:

$$\beta = \sqrt{\frac{\left(\omega_0^2 + \frac{2 \cdot g \cdot M \cdot a}{I_b} (1 - \cos \omega_0) \right) \cdot I_b}{4 \cdot g \cdot M \cdot a}} \quad (4)$$

Donde:

- ω_0 es la velocidad angular de la campana, dada por la ecuación:

$$\omega_0 = n \cdot \pi / t \text{ (rad / s)}, \quad (5)$$
 siendo n el número de golpes del badajo, y t el tiempo transcurrido, en segundos.

Es decir, el valor de la reacción horizontal va a depender de la velocidad de volteo que se le asigne al motor que las va a accionar. Si se conoce la frecuencia natural de la torre en la que está colocada la campana, y la de sus armónicos correspondientes, se puede fijar una velocidad de volteo que esté alejada de ellas para evitar en lo posible las resonancias.

La velocidad de giro es un factor que afecta no solo a aspectos estructurales de la torre, sino que también influye en la producción del sonido de las campanas, con el correspondiente efecto social.

Velocidades de giro habituales suelen estar entre 2 y 4 rad/s, es decir entre 0,2 y 0,4Hz. Por tanto, es importantísimo llegar a conocer estos datos para buscar el compromiso entre las costumbres arraigadas y la estabilidad estructural de la torre.

3. Las campanas de la Catedral de Cádiz

La Catedral de Cádiz cuenta con 10 campanas cuyas características físicas se indican en la tabla II. Todas están diseñadas para funcionar a baneo, pero en la restauración que se le acaba de hacer se ha cambiado el sistema para que funcione a volteo.

Está demostrado que el sistema español de volteo genera unas reacciones horizontales mucho menores que los sistemas de baneo, principalmente debido a que el desequilibrio en ese primer sistema es mucho menor.

Tabla II. Características físicas de las campanas de la Catedral de Cádiz

Posición (1)	Nombre	Diámetro (2)	Peso (3)	
Torre de Levante	A	Sto. Domingo de Silos	143	1455
	B	Ntra. Sra. de la Luz	78,4	270
	C	Santa Cruz	155	3084
	D	Ntra. Sra. Del Rosario	97,5	544
	E	San Pedro	105	705
Torre de Poniente	I	San Félix de Cantalicio	105	765
	J	San Fernando	60	135
	K	Santos Patronos	105	720
	L	San José	82	445
	M	San Sebastián	106	660

(1) Se refiere a la posición de la campana respecto al croquis que se indica en la figura 3.

(2) Es el diámetro de la boca de la campana, en cm.

(3) Es el peso de la campana, sin yugo ni herrajes, Kg.

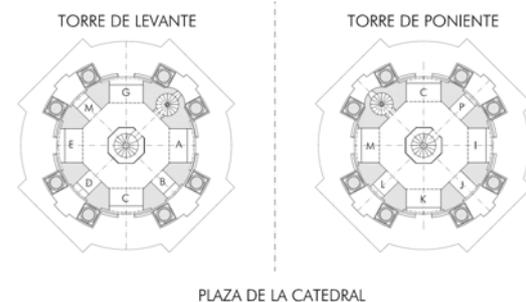


Figura 3. Croquis con la posición de cada una de las campanas.

4. Metodología experimental

El 11 de noviembre de 2008, con una temperatura de 13°C, una presión atmosférica de 1010mbar, una humedad relativa del 75%, y una velocidad del viento de 10Km/h, se visitó la torre analizada. Se disponía del siguiente equipamiento y software:

- Analizador de espectro Brüel & Kjaer Type 2556 MK2

- Acelerómetro piezoeléctrico Brüel & Kjaer Type 4391
- Software Sentinel Type 7107M
- Medidor láser de longitudes Bosch DLE 50 Professional
- Estación meteorológica Oregon Scientific.

Se configuró el analizador de espectro para realizar 3 tipos de medidas:

- Frecuencia de oscilación de la torre: se configuró un filtro de paso alto a 1Hz conforme a las aproximaciones realizadas a partir de los métodos indicados en la norma española sismorresistente [3]. Además se configuró una ventana hanning y se consiguió una resolución espectral de 0,25Hz.
- Frecuencia de oscilación de las campanas: autoespectro entre 1Hz y 1kHz, con ventana hanning y resolución espectral de 2,5Hz.
- Medición de la amplitud de oscilación de la torre: Filtro de paso alto a 1Hz, tiempo de promediado de 5s, detector RMS, y unidad de medida: velocidad.

Se realizaron los ensayos en las campanas I y en la J de la Torre de Poniente, por ser las de mayor y menor peso respectivamente.

Se colocó el acelerómetro en las siguientes posiciones:

- Boca de la campana con el badajo golpeando en la misma posición del acelerómetro. El badajo se movía a mano.
- Boca de la campana con el badajo golpeando en la posición diametralmente opuesta respecto a la del acelerómetro. El badajo se movía a mano.
- En el badajo.



Figura 4. Colocación del acelerómetro en la boca de la campana

5. Resultados de los ensayos en las campanas

En la campana J se realizaron ensayos colocando el acelerómetro en la posición de golpeo del badajo y en la diametralmente opuesta. Se consiguió repetitividad en el valor de las frecuencias, con una resonancia a 185Hz, y armónicos y medios armónicos a 347,5Hz y

460Hz. Sin embargo, las amplitudes fueron mayores si el acelerómetro estaba en la posición diametralmente opuesta a la zona de golpeo del badajo.

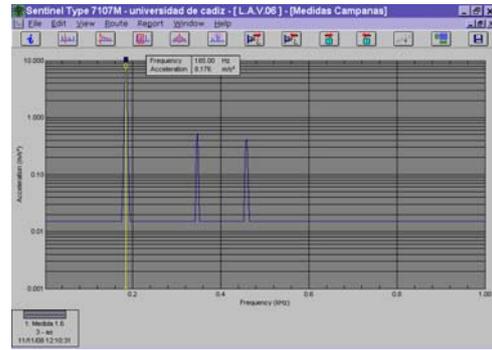


Figura 5. Espectro de la medida en la campana J, con el acelerómetro en la posición diametralmente opuesta a la de golpeo del badajo

En el caso de la campana I, de mayor peso, las frecuencias obtenidas fueron de 317,2Hz, 617,5Hz, y 932,5Hz.

Además se realizaron ensayos en el badajo J en los que se detectaron que las frecuencias principales coincidían con las de las campanas, de lo que se desprende que había una transmisión de vibraciones entre ambos elementos.

6. Ensayos en la torre

Se han realizado ensayos en la parte superior del campanario con el fin de determinar las características dinámicas de la torre. Esto es, principalmente su frecuencia natural.

La norma de construcción sismorresistente (NCSE-02) [3] propone como valor estimado de la frecuencia natural para construcciones esbeltas:

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{L}}{0.06 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{H}{2 \cdot L + H}}} \tag{6}$$

$$\omega_2 = 3 \cdot \omega_1$$

$$\omega_3 = 5 \cdot \omega_1$$

Donde:

L es la dimensión en planta del edificio en la dirección de la oscilación

H es la altura del edificio

Bajo estas premisas, y sabiendo que en nuestro caso L=15 m y que H=57,6 m, las frecuencias serían:

$$\omega_1=1,70 \text{ Hz}; \omega_2=5,10 \text{ Hz}; \omega_3=8,5 \text{ Hz}$$

Se han realizado ensayos in situ para la determinación de la frecuencia natural de la torre y para analizar el efecto del movimiento de

una de las campanas sobre la estructura de esta torre.

Al hacer las mediciones considerando únicamente el efecto del viento se detectó un pico de aproximadamente 0,32mm/s a la frecuencia de 1Hz, por lo que se puede considerar que ésta es la frecuencia de resonancia de la torre.

Además se realizó una medición colocando el transductor en la torre, justo debajo de la campana J (la de menor peso), con el fin de detectar transmisiones de vibraciones de la campana hacia la estructura de la torre.

Se constató que existe una transmisión importante de vibraciones, pero en un rango de frecuencias alejado de la frecuencia natural de la torre. Además también se detectaron modulaciones laterales en los extremos de frecuencias superior e inferior. Los picos están a 317,5, 335, y 617,5Hz.

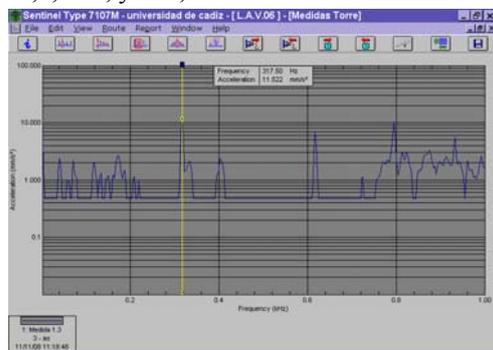


Figura 7. Pantalla de los resultados obtenidos con el acelerómetro en la torre, con la campana J en movimiento.

7. Conclusiones

Respecto a los ensayos en las campanas se enumeran las siguientes conclusiones:

- El estrés de la campana es mayor en el punto diametralmente opuesto a aquél en el que golpea el badajo, corroborando lo indicado por Andreas Rupp [4].
- Existe una transmisión de vibraciones muy considerable de la campana al badajo, lo que lleva a recomendar descolgar este último para el cálculo de su frecuencia natural.
- Sería interesante analizar el efecto del yugo de madera, cuya función principal es equilibrar las masas y reducir las vibraciones, sobre la campana.

Respecto a los ensayos realizados en la torre, se ha explicado una manera rápida de medir la frecuencia natural de una construcción. A partir de aquí se podría llegar a calcular el amortiguamiento viscoso y el módulo de elasticidad medio. Estos datos nos sirven para buscar que las frecuencias de oscilación de las

campanas queden alejadas de ellas y así llegar a obtener coeficientes de amplificación dinámicos (D.A.F.) de valor unitario. En cualquier caso, se puede concluir que:

- La rigidez de la torre es muy alta, teniendo en cuenta que el valor máximo de desplazamiento horizontal permitido por la normativa actual de hormigón estructural es de $H/2000$, siendo H la altura considerada. El valor máximo para una estructura de hormigón de la misma altura que la torre de poniente podría ser de hasta 18 mm, casi 100 veces mayor al obtenido en los ensayos.
- El movimiento de la campana ejerce una acción muy significativa sobre la torre.

8. Corolario

Ha quedado constancia en este documento que la utilización de analizadores de espectro para el estudio de las vibraciones transmitidas a un edificio es un método rápido, económico, no destructivo, y fiable. Cuanto más si este edificio está catalogado como Bien de Interés Cultural.

Las construcciones con un alto valor arquitectónico y/o cultural deberían ser ensayadas con este tipo de equipamiento y de esa forma podrían ser modelizadas en programas de cálculo por elementos finitos, como ANSYS. Esto permitiría llegar a un modelo matemático que sirva de base para probar distintos tipos de configuraciones de campanas y de mecanismos de accionamiento, sin necesidad de tener que estar colocadas en su ubicación definitiva. En los modelos informáticos los parámetros pueden ser modificados y así investigar su influencia.

Lo mismo podría decirse de las campanas. Si se hiciese un análisis modal de cada una de las campanas para verificar la validez del modelo matemático, podríamos saber sus características físicas y acústicas sin necesidad de construirlas. Esto permitiría afinarlas, predecir los puntos con más riesgos de rotura, etc.

9. Referencias

- [1] La Catedral de Cádiz fue declarada BIC el BOJA 21/12/200.
- [2] Salvador Ivorra, María José Palomo, Gumersindo Verdú, Alberto Zasso. "Dynamic Forces Produced by Swinging Bells". *Meccanica* (2006) 41:47-62.
- [3] Real Decreto 997/2002, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación.
- [4] Andreas Rupp. Ringing Bells – State of the Art in the Durability Evaluation of Church Bells. University of Applied Sciences Kempten. Germany.

Estudio del efecto microlente mediante simulación de patrones de magnificación y análisis estadístico de la concentración de cáusticas

T. Mediavilla Gradolph⁽¹⁾, O. Ariza Sánchez⁽²⁾, E. Mediavilla Gradolph⁽³⁾

⁽¹⁾Ciencias Aplicadas a la Empresa, E. U. "Tomás y Valiente" Alfonso XI, 675677201.
teresa.mediavilla@ca.uca.es

⁽²⁾ Estadística e Investigación Operativa. E.P.S. de Algeciras Avda Ramón Puyol, s/n 11202, Algeciras.

⁽³⁾Astrofísica. Facultad de Física. Avda Astrofísico Francisco Sánchez, s/n.38206, La Laguna.

Resumen

Con el objeto de estudiar el efecto microlente nos planteamos como objetivo principal simular los patrones de magnificación para distintas densidades superficiales de masa y para distintas distribuciones de estrellas según su masa y estudiar estadísticamente la influencia de estos parámetros y de la velocidad transversal entre las microlentes y la fuente en la abundancia y concentración de cáusticas. En esta comunicación se exponen los pasos seguidos para alcanzarlo así como los resultados obtenidos.

1. Introducción

El efecto lente gravitatoria es una herramienta de gran interés en Astrofísica y Cosmología ya que permite medir la cantidad de masa en los objetos que actúan como lente, asunto de crucial importancia cuando parece que casi toda la materia del universo es invisible y de naturaleza desconocida.

Los estudios del efecto microlente permiten determinar la existencia y características de objetos compactos entre el observador y la fuente, el tamaño de los cúasares, el perfil bidimensional de brillo de los cúasares y la masa (y la distribución de masa) de los objetos lente.

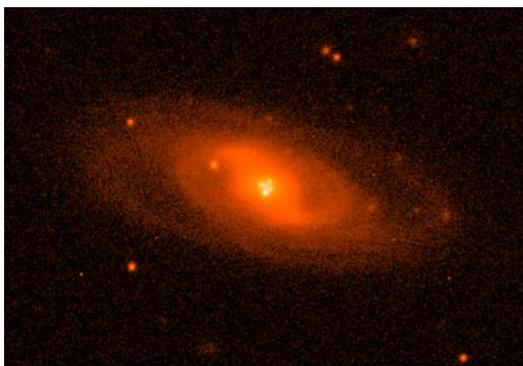


Figura 1. Imagen del sistema lente gravitatoria QSO 2237+0305

Como el efecto lente de más de dos lentes puntuales no puede ser tratado fácilmente con métodos analíticos se han desarrollado técnicas numéricas para simular el efecto lente gravitatoria producido por una distribución de

objetos compactos. Paczynski (1986) ha desarrollado un método para buscar los puntos estacionarios en la superficie que describe el retraso temporal [1]. Kayser, Refsdal y Stabell (1986), Schneider y Weiss (1987) y Wambsganss (1990) han desarrollado y aplicado la técnica del Trazado Inverso de Rayos, IRS, que genera la distribución de magnificación en el plano fuente (patrones o mapas de magnificación) [2-4]. Una técnica alternativa fue desarrollada por Witt (1993) y Lewis y sus colaboradores (1993) resolviendo la ecuación de la lente a lo largo de una dimensión en el plano fuente [5,6]. Gran parte del trabajo teórico reciente está basado en alguna de estas técnicas.

Los patrones de magnificación y las curvas de luz simuladas de las fuentes sometidas a *microlensing* contienen información a todas las escalas de magnificación. Sin embargo un estudio estadístico que tenga en cuenta la variabilidad continua de un objeto se enfrenta a dos tipos de problemas. Por un lado, es necesario comparar las curvas de luz experimentales con un gran número de simulaciones [7]. Por otro lado, los errores experimentales y otras fuentes de variabilidad diferentes del *microlensing* pueden afectar significativamente a los datos y a los resultados.

Proponemos simplificar el problema reduciendo el fenómeno del *microlensing* a una serie de eventos discretos, los cruces por cáustica. Si el tamaño de la fuente es lo suficientemente pequeño (fuente emisora en rayos X) cada cruce por cáustica aparece separado de los demás, sería de una gran amplitud (poco afectado por los errores de medida) y sería difícil de confundir con otros tipos de variabilidad.

Por lo tanto nuestro objetivo principal es simular los patrones de magnificación para distintas densidades superficiales de masa y para distintas distribuciones de estrellas según su masa y estudiar estadísticamente la influencia de estos parámetros y de la velocidad transversal entre las microlentes y la fuente en la abundancia y concentración de cáusticas.

La programación del algoritmo utilizado en el método de simulación de trazado inverso de rayos es muy sencillo, pero el tiempo de ejecución puede ser muy grande en las aplicaciones que nos interesan, por lo tanto uno de nuestros objetivos iniciales es la optimización del algoritmo de cálculo y/o acelerar la ejecución del código para mejorar la validez estadística del estudio de los patrones de magnificación.

El aspecto más retador es la estimación de los parámetros que intervienen (ley de distribución de masas, tamaño de la fuente, etc.) a partir de los datos experimentales (curvas de luz) y las simulaciones mediante un estudio probabilístico.

Para poder alcanzar las metas planteadas por el problema físico es necesario el reconocimiento de las cáusticas y el análisis estadístico de su concentración.

El mejor escenario real para estudiar el efecto microlente es el cuásar cuádruple QSO 2237+0305 [4,5,6,9] ya que debido al alto grado de simetría del sistema, la proximidad de la galaxia lente y la pequeña separación entre las imágenes, el tiempo de retraso predicho para las cuatro imágenes es de un día o menos. Además, las cuatro imágenes cruzan el bulbo de la galaxia donde la abundancia de las estrellas es muy alta. Por lo tanto el efecto microlente se puede observar rutinariamente en este objeto [8, 10, 11, 12, 13]. Estos aspectos son los que nos han motivado a escoger a QSO 2237+0305 como prototipo experimental para desarrollar nuestro trabajo.

2. Metodología Experimental

En una primera fase del trabajo hemos desarrollado un nuevo método para la simulación de patrones de magnificación, Trazado Inverso de Polígonos, IPM. Para comprobar su eficacia y precisión lo hemos comparado con el método del Trazado Inverso de Rayos calculando patrones de magnificación con ambos métodos. (Los dos métodos han sido implementados en FORTRAN). Además hemos estimado el ruido en cada patrón de magnificación para medir la desviación típica.

En la siguiente fase hemos realizado las simulaciones de los patrones de magnificación para distintas densidades de materia y rangos de

masas en la distribución de estrellas utilizando el método IPM. A partir de estos patrones de magnificación hemos detectado las cáusticas para poder realizar el análisis estadístico de su concentración. Hemos planteado dos métodos para hacer este análisis, uno basado en la cuenta de cruces por cáustica en una ventana de observación para los datos simulados. Los resultados obtenidos se comparan con la distribución de probabilidad teórica que tendrían los datos, que en este caso es la distribución binomial. Y otro método basado en las separaciones entre eventos en los datos simulados que compararemos con la distribución geométrica. Para realizar el análisis estadístico ha sido necesario crear varios programas en FORTRAN.

Por último se ha aplicado el estudio estadístico al caso real QSO 2237+0305.

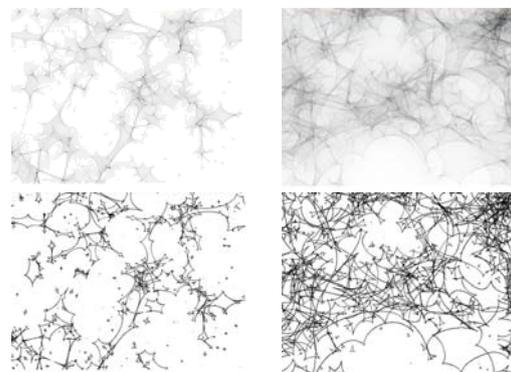


Figura 2. Parte superior patrones de magnificación. Parte inferior cáusticas. Parte izquierda estrellas de masa distribuida en un rengó. Parte derecha estrellas de masa única. (Densidad de materia = 0.7)

3. Resultados y Discusión

El nuevo método desarrollado, IPM, obtiene una precisión difícil de alcanzar con el método de trazado inverso de rayos. Además consigue una mejora en la velocidad de más de dos órdenes de magnitud cuando se requiere el mismo grado de precisión con ambos métodos. Este aumento en la eficiencia puede ser crucial en nuevos campos de investigación como el análisis Bayesiano de datos experimentales basado en simulaciones del efecto microlente, que actualmente está limitado por el coste computacional.

El método de la transformación inversa de polígonos permite un control de las propiedades de la transformación de la lente en cada celda del plano imagen.

A la hora del estudio estadístico de la concentración de cáusticas nos hemos planteado

estudiar cómo afecta la existencia de un rango de masas en la distribución de estrellas a la concentración de cáusticas. El método IPM ha demostrado su utilidad para identificar las cáusticas de un mapa de magnificación. A partir de los resultados obtenidos hemos probado dos tipos de análisis. A continuación se exponen los resultados obtenidos con ambos métodos:

-Análisis estadístico de la concentración de cáusticas basado en la cuenta de cruces por cáustica en una ventana observacional:

(i) A medida que aumenta la densidad superficial de materia, la distribución experimental se separa de la teórica, lo que se esperaba ya que la distribución de cáusticas no es completamente aleatoria debido a que hay una tendencia a la acumulación de cáusticas cuando varias estrellas se encuentran cerca.

(ii) La abundancia (probabilidad de encontrar una cáustica) y concentración (probabilidad de encontrar un número alto de cáusticas en una ventana) depende conjuntamente de la densidad de materia y de la función de masas de las estrellas. Para densidades medias y alta (0.5 y 0.7) aumentan para la distribución unimodal de estrellas de una masa solar. Sin embargo esta situación se invierte para el caso de densidades bajas (0.3).

(iii) En el caso de mayor densidad (0.7) las diferencias entre las distribuciones de probabilidad correspondiente a funciones de masa de las estrellas unimodales o distribuidas en un rango es muy significativa sobre todo para las ventanas de observación de mayor tamaño (400 y 200 píxeles). En el caso de una densidad de valor 0.5 las diferencias son más sutiles aunque se pueden detectar para las ventanas del mismo tamaño que las anteriores. En el caso de densidad 0.3 las diferencias entre las funciones de distribución parecen difíciles de medir.

(iv) En el caso de mayor densidad, desde un punto de vista experimental, una única medida del número de cáusticas detectadas en una ventana de 400 píxeles podría ser más que suficiente para escoger entre las hipótesis de funciones de masa de las estrellas unimodales o distribuidas en un rango. Para corroborarlo hemos realizado un análisis bayesiano de la cuenta de cruces por cáustica.

(v) Los resultados obtenidos en las simulaciones nos indican que la posibilidad de romper la degeneración tamaño de la ventana/velocidad transversal depende del caso. En la simulación con densidad 0.7 y distribución unimodal de masa, una medida alta del número de cáusticas (>15) en una ventana de tamaño desconocido implicaría que el tamaño estaría con mucha probabilidad por encima de los doscientos píxeles, una medida baja (<5) indicaría que la

ventana tendría un tamaño menor de doscientos píxeles. Esta posibilidad de romper esta degeneración no sería posible en los demás casos estudiados.

- Análisis estadístico de la concentración de cáusticas basado en la separación entre eventos:

(i) Las distribuciones experimentales de separaciones muestran una mayor probabilidad para separaciones pequeñas debido al *clustering* inducido por el efecto lente.

(ii) Parece difícil distinguir entre las hipótesis de estrellas de masas en un rango y de estrellas de masa única.

(iii) En el caso de densidad de materia 0.7, las diferencias entre las simulaciones y las distribuciones teóricas permiten distinguir entre las dos hipótesis.

(iv) Las diferencias entre distribuciones experimentales y teóricas pueden interpretarse cualitativamente incluso asumiendo una dilatación en la escala de separaciones, lo que querría decir que podríamos disponer de un criterio insensible a la degeneración tamaño/velocidad. A pesar de esta gran ventaja para distinguir entre ambas hipótesis necesitaríamos determinar las distribuciones de probabilidad para valores relativamente bajos lo que implicaría gran tiempo de observación.

Experimentalmente observamos que es más accesible el estudio basado en la cuenta de cáusticas, ya que con un único valor, el número de cruces por cáustica en una ventana, nos puede proporcionar un criterio para distinguir entre las dos hipótesis en casos de gran densidad.

Para terminar el estudio hemos aplicado los métodos anteriores a la cruz de Einstein, QSO 2237+0305, obteniendo los siguientes resultados:

(i) La abundancia y concentración de cáusticas aumentan cuando las distribuciones están distribuidas en un rango para las cuatro imágenes.

(ii) Haciendo un estudio para el eje X en la imagen D para ventanas de 400 y 200 píxeles observamos que las diferencias entre las distribuciones de probabilidad correspondientes a funciones de masa de las estrellas unimodales o distribuidas en un rango son muy significativas. Para el resto de las imágenes las diferencias son menos acusadas. En el eje Y obtenemos resultados similares.

(iii) En el caso de la imagen D, desde un punto de vista experimental, una única medida del número de cáusticas detectadas en una ventana de 400 píxeles sería suficiente para decidir entre estrellas de masa distribuidas en un rango o una distribución unimodal de masa. Hecho que se constata con un análisis bayesiano.

(iv) La aplicación del análisis estadístico basado en la separación de eventos nos permitirá distinguir entre las dos hipótesis en el eje Y, pero necesitaríamos gran tiempo de observación para determinar la función de distribución.

4. Conclusiones

Hemos desarrollado un nuevo método para simular los patrones de magnificación, Trazado Inverso de Polígonos que es más eficiente y preciso que el método de Trazado Inverso de Rayos utilizado habitualmente en los estudios sobre el efecto microlente.

Hemos desarrollado un procedimiento (en forma de expansión en serie) para el cálculo de patrones de magnificación. El método se basa en la transformación inversa bajo la acción de la ecuación de la lente de una partición del plano imagen de celdas poligonales que no incluyan puntos críticos.

El término de orden cero de la expansión en serie coincide con el método que hemos descrito. El primer término lo hemos usado para estudiar el error cometido al truncar la serie en el orden cero, explicando la gran precisión del método. Al interpretar el método del trazado inverso de rayos en términos del método del trazado inverso de polígonos, explicamos teóricamente la dependencia, $N^{-3/4}$, del error del IRS con el número de rayos por píxel.

Hemos comprobado que la abundancia y concentración de cáusticas se ve afectada por la función de distribución de masas de las microlentes. El efecto es mayor para densidades altas y se ve afectado por el *shear*.

Respecto a los dos tipos de análisis estadísticos aplicados hemos observado que para valores relativamente altos de densidad, una única medida de cruces por cáustica en una ventana de 400 ó 200 píxeles puede ser suficiente para distinguir entre el caso de una distribución de microlentes en un rango y una distribución de masa única. Para valores de densidad menor sería necesario aumentar la ventana de observación para obtener resultados concluyentes. La estadística de separaciones también muestra una dependencia notable con la función de masas de las microlentes, pero para utilizarla habría que aumentar el tiempo de observación.

Al aplicar los estudios estadísticos al caso real, QSO 2273+0305 hemos obtenido que para la imagen D la detección de un número relativamente bajo de eventos permitiría distinguir con una probabilidad alta entre las hipótesis de estrellas de masa única y de estrellas con masas distribuidas en un rango.

El estudio de la estadística de cruces por cáustica podría permitir también determinar

aproximadamente el tamaño de la ventana de observación lo que representa un gran avance para romper la degeneración tamaño/velocidad en las curvas de luz de sistemas lente.

5. Agradecimientos

Proyecto subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia AYA2007-67342-C03-01.

6. Referencias

- [1] Paczynski, B., "Gravitational Microlensing at large optical depth", *Astrophys. J.*, **301**, 503-516, (1986).
- [2] Kayser, R., Refsdal, S., & Stabell, R., "Astrophysical applications of gravitational microlensing" *A&A*, 166, 36, (1986)
- [3] Schneider, P., Weiss, A., "A gravitational lens origin for AGN-variability? Consequences of micro-lensing", *A&A*, **171**, 49-65, (1987).
- [4] Wambsganss, J., Paczynski, B., and Schneider, P., "Interpretation of the microlensing event in QSO 2237+0305", *Astrophys. J.*, 358, L33-L36, (1990).
- [5] Witt, H. J., Kayser, R. and Refsdal, S., "Microlensing predictions for the Einstein Cross 2237+ 0305" *Astron. Astrophys.*, 268, 501-510, (1993).
- [6] Lewis, G. F., et al., "Microlensing induced spectral variability in Q2237+0305", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **295**, 573, (1998).
- [7] Kochanek, C. S. "Quantitative interpretation of quasar microlensing light curves" *Astron. J.* 605 ,58-77, (2004).
- [8] Corrigan, R. T., et al., "Initial light curve of Q2237 + 0305", 1991, *AJ* **102**, 34, (1991).
- [9] Ostensen, R., et al., "Monitoring of the Einstein Cross with the Nordic Optical Telescope", *Astron. Astrophys. J.*, 303, 59-64, (1996).
- [10] Irwin, M. J., Webster, R. L., Hewett, P. C., Corrigan, R. T., Jędrzejewski, R. I., "Photometric variations in the q2237+0305 system: first detection of a microlensing event" *Astron. J.* 98, 1989-1994, (1989).
- [11] Pettersen, B. R., Korhonen, I., Stabell, R., Knain, E. and Schramm, J., QSO 2237+0305, IAU Circular, 5099, 2. Editado por Green, D., W., E., (1990)
- [12] Racine, R., "Continuum and CIII] Microlensing in 2237+0305 and the Quasar Geometry", *ApJ*. 395, 65-67, (1992)
- [13] Yee, H. K. C., De Robertis, M. M., "Lyman-alpha and C IV narrow-band imaging of the gravitational lens 2237 + 030", *ApJ*, 398, nº 1, p. L21-L24, (1992).

Estudio del Torneado en Seco de la aleación Ti-6Al-4V a partir de la Inspección SOM de la Herramienta y la Viruta obtenida

J. Gerez Miras⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾ISEMER, Base Naval de Rota, 11530 Rota-Naval, Cádiz, 956 826 850, jgerezm@fn.mde.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/ Chile, 1. 11002 Cádiz, 956 015 103.

Resumen

Se presentan en este trabajo los últimos avances en cuanto a la tesis doctoral en desarrollo. Dicha tesis se enmarca en la relación Universidad-Empresa, en concreto en las necesidades de las empresas relacionadas con el sector aeronáutico y su deseo de avanzar en la ingeniería de fabricación innovando en cuanto a procesos sostenibles. Se parte de unas hipótesis como encontrar las condiciones de maquinabilidad de las aleaciones de titanio aeronáutico y posibles relaciones entre parámetros de mecanizado implicados. Para ello no sólo hay que llevar a cabo una parte experimental en sí misma, sino revisiones bibliográficas actualizadas del tema y planes de trabajo detallados para llegar a conclusiones satisfactorias.

1. Introducción

El desarrollo de las etapas de este trabajo se sitúa en la evolución de la labor investigadora del grupo Tecnología de Materiales de la Universidad de Cádiz.

La sinergia entre la Universidad y la Empresa se muestra en los diferentes proyectos que el Grupo ha llevado a cabo, investigando en línea con el trabajo realizado en empresas de la Bahía de Cádiz como AIRBUS y Airbus Military.

Dentro de la línea del mecanizado de aleaciones ligeras, utilizadas en este tipo de construcciones industriales, se han alcanzado importantes conocimientos en cuanto a mecanizado de aleaciones de aluminio [1,2], abriendo nuevos campos en los últimos cuatro años al mecanizado de aleaciones de titanio [3,4] y otras líneas relacionadas como el comportamiento frente a la corrosión en diferentes condiciones de servicio de las aleaciones de uso aeronáutico [5].

En relación con lo comentado, y con la búsqueda del desarrollo sostenible en la ingeniería del mecanizado [6], los objetivos que se pretenden llevar a cabo en el trabajo, abarcan desde el conocimiento de la aleación de titanio UNS R56400 y su comportamiento en procesos de mecanizado, hasta la definición de modelos paramétricos para las variables implicadas en dichos procesos, centrándose en el torneado.

Para un análisis preliminar como base para el trabajo de investigación realizado en el programa de doctorado "Ingeniería de Fabricación", durante el periodo docente 2004/2006, se llevaron a cabo ensayos que han

consistido en procesos de cilindrado de 10 segundos de duración, fijando la profundidad de corte y variando velocidad de corte y avances. Como herramienta de corte se utilizaron plaquitas neutras de WC-Co.

Estos ensayos se realizaron en ausencia de fluidos lubricantes, tratando de evitar implicaciones negativas para el medioambiente y para la salud laboral, teniendo presente que el titanio se considera un material de baja maquinabilidad por su baja conductividad térmica [7,8].

El rango de valores para las velocidades de corte ha sido de 25, 38 y 50 m/min y dos avances diferentes para estas velocidades, 0,2 y 0,3 mm/rev.

Para las velocidades de corte y avances utilizados, fijando la profundidad en 0,5 mm, no se establecieron tendencias claras en cuanto a la calidad superficial de la aleación (medida en términos de la rugosidad media aritmética) y las características macrogeométricas de la viruta obtenida. Sin embargo, en lo relacionado con la microestructura de la viruta al aumentar la densidad de la segmentación de la misma [9], correspondiendo a una mayor velocidad de corte, se produce un descenso de Ra [8].

Paralelamente se llevó a cabo un estudio de los diferentes cambios tanto de la composición como a nivel microestructural de las herramientas empleadas, alteraciones que aumentaban con la velocidad y el avance.

De la base expuesta se continúa trabajando en los objetivos a conseguir arriba comentados.

2. Metodología Experimental

De forma simultánea se está llevando a cabo una revisión bibliográfica o estado del arte de la aleación y los aspectos relacionados con su proceso de torneado en seco y, una parte propiamente experimental, de los ensayos de torneado en el taller mecánico de la Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz.

En relación a la parte experimental en el taller, ésta ha consistido en el torneado en seco de la aleación en estudio con herramientas de metal duro sin recubrimiento. Se tiene previsto llevar a cabo ensayos similares con herramientas de WC-Co recubiertas de TiN.

Las velocidades de corte han variado entre 25 y 125 m/min y los avances entre 0,05 y 0,2 mm/rev.

Los ensayos se han llevado a cabo en un centro de torneado Emco Turn 242, equipado con control numérico EMCO, modelo EmcoTronic TM02 y que se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Torno horizontal con control numérico

Para evaluar la calidad de acabado superficial se ha utilizado el rugosímetro PeCo T que aparece en la Figura 2, con el software Perthometer Concept. Para cada uno de los ensayos se han adquirido los perfiles sobre cuatro generatrices de la pieza cilíndrica mecanizada, separadas 90°. El parámetro que se va a utilizar para el análisis de la calidad superficial corresponde a la rugosidad media aritmética (R_a) que junto con R_z (máxima altura del perfil) son los indicadores más empleados [10].

En un primer nivel, las herramientas de corte utilizadas se han analizado aplicando técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM). Para ello se ha utilizado el microscopio óptico Nikon SMZ 800 equipado con una cámara digital KAPPA DX10, mostrado en la Figura 3, el objetivo de este primer análisis es obtener una idea inicial de las transformaciones que han sufrido las mismas. De igual forma, la viruta

recogida también ha sido observada mediante técnicas SOM.



Figura 2. Rugosímetro PeCo T



Figura 3. Microscopio óptico para primer análisis de viruta y herramientas

Con estos equipos utilizados se ha trabajado, en un primer nivel, como se ha comentado, sobre la aleación ensayada y las plaquitas de corte utilizadas, junto con la viruta obtenida, de forma que, con los datos obtenidos, empiecen a vislumbrarse posibles relaciones entre rugosidad y parámetros tecnológicos de entrada, condiciones de maquinabilidad de las aleaciones de titanio y características del crecimiento de los efectos de adhesión en las distintas zonas de la herramienta en el mecanizado en seco

3. Resultados y Discusión

En las tablas I y II se presentan, de forma gráfica, las primeras observaciones de las herramientas y la tipología de la viruta obtenida. Se observa claramente en las herramientas la línea de desgaste y acumulación del material aunque la incorporación de material a la misma se aprecia para los valores más bajos de la velocidad de corte y avance. Especial atención merece el análisis de la herramienta para una velocidad de corte de 100 m/min y 0,05 mm/rev

para el avance, donde se aprecia claramente la zona de la cara de desprendimiento de la herramienta, más oscura (véase la Tabla I), que podría deberse a la formación de óxidos de titanio por la alta tendencia del mismo a la oxidación. También se puede observar la acumulación de material en la punta de la plaquita aunque la tendencia no está muy definida.

Tal y como ya se ha podido comprobar con anterioridad en ensayos preliminares, la viruta se presenta continua (y segmentada, característica de este tipo de aleaciones) y podría decirse que a mayor velocidad de corte y

menores avances, la viruta nos indicaría menor maquinabilidad para este tipo de aleaciones.

La calidad superficial de la aleación, analizada en términos de la rugosidad media aritmética, disminuye a medida que aumenta el avance, para la rugosidad en función de la velocidad de corte, mientras que, comparando los datos de rugosidad en función de los avances estudiados, la menor velocidad de corte presenta en líneas generales, los mayores valores.

Con estos datos estudiados es complicado establecer relaciones entre la geometría de la viruta y la rugosidad como claves para el concepto de maquinabilidad de la aleación Ti-6Al-4V.

Tabla I. Macrografías SOM de las herramientas de corte

		Velocidad de corte (m/min)				
		25	50	75	100	125
Avance (mm/rev)	0,05					
	0,1					
	0,2					

Tabla II. Muestras de viruta obtenida en los ensayos de torneado

		Velocidad de corte (m/min)				
		25	50	75	100	125
Avance (mm/rev)	0,05					
	0,1					
	0,2					

4. Conclusiones

De las macrografías de la herramienta de metal duro al someterlas a un proceso de torneado en

seco de la aleación Ti-6Al-4V se observa cómo las deposiciones de material aparecen para los menores valores de velocidad, no pudiendo

establecer una clara relación con la tipología de la viruta obtenida. Un siguiente paso sería la observación mediante vídeo del proceso de mecanizado para estudiar como se va formando la viruta y el contacto viruta-plaquita.

Se debe profundizar en los casos excepcionales como el indicado en la tabla I y el análisis mediante otras técnicas como SEM y EDS que permitan determinar los tipos de desgaste presentados. Para los valores de rugosidad de la aleación, sí se podrían encontrar relaciones entre la calidad de acabado superficial y los parámetros de entrada, como la velocidad de corte y el avance.

5. Referencias

- [1] E. M. Rubio, A. M. Camacho, J. M. Sánchez-Sola, M. Marcos, Surface roughness of AA7050 alloy turned bars. Analysis of the influence of the length of machining, *J.Mat.Proc.Tech.* **162-163** (2005) 682-689.
- [2] J. M. Sánchez, M. A. Sebastián, M. S. Carrilero, J. M. González, M. Marcos, Parametric Model for Predicting Surface Finish of Machined AA2024 Alloy Bars, *International J. Manufacturing Science and Production* **Vol. 4** (2002) 181-188.
- [3] M. Huerta, J. Gerez, M. S. Carrilero, J. Salguero, M. Batista, M. Marcos, *Análisis y evaluación de las tensiones residuales en el mecanizado de aleaciones de titanio*, Congreso nacional de materiales, Bilbao, 2008.
- [4] J. Gerez, M. Sánchez-Carrilero, J. Salguero, M. Batista, M. Marcos, *Estudio mediante SEM y EDS de las alteraciones microestructurales de la herramienta en el mecanizado en seco de la aleación Ti6Al4V (UNS R56400)*, 3rd Manufacturing Engineering Society International Conference, Alcoy, 2009.
- [5] J. E. Díaz Vázquez, *Influencia del Proceso de Conformado en el Comportamiento Frente a la CBT de Aleaciones de Aluminio. Análisis del Estado del Arte*, Proyecto Fin de Master, Universidad de Cádiz, 2009.
- [6] J.L. Cantero, M.M. Tardío, J.A. Canteli, M. Marcos and M.H. Miguélez, Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V, *International J. Machine Tools and Manufacture* **45** (2005) 1246-1255.
- [7] M. Batista, J. Salguero, J.E. Ares, M.S. Carrilero, M. J. Cano, M. Marcos, *Estudio mediante SEM y EDS de los cambios microestructurales de la herramienta en el mecanizado en seco de aleaciones de titanio*, X Congreso de Materiales de Vigo, Vigo, 2006.
- [8] J. Gerez, J., J. E. Díaz Vázquez, J. M. González Madrigal, M. Batista, M. Marcos, *Estudio de las características morfológicas de la viruta en el torneado en seco de aleaciones de titanio y su relación con el acabado superficial*, 3rd Manufacturing Engineering Society International Conference, Alcoy, 2009.
- [9] A. Molinari, C. Musquar, G. Sutter, Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling, *International J. Plasticity* **18** (2002) 443-459.
- [10] M.A. Sebastián, J.M. Sánchez-Sola, M.S. Carrilero, J.M. González, M. Álvarez, M. Marcos, Parametric model for predicting surface finish of machined UNS A92024 alloy bars, *Int. J. Man. Sci & Prod.*, **4(4)** (2002) 181-188.

Fabricación Lean y Conformado de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica Termoestable

J. Raposo Barrada⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾ C/Santa Teresa de Jesús, 23 11010 Cádiz, (+34) 647453312, jraposob@gmail.com.

⁽²⁾ Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería C/ Chile, 1 11002 Cádiz.

Resumen

Los procesos y sistemas de fabricación de elementos con material compuesto de matriz termoestable implican múltiples operaciones manuales y una distribución en planta por talleres aunque también una incipiente automatización. La fabricación Lean promueve la eliminación de despilfarros y la consecución de un sistema de flujo de una sola pieza mediante la adaptación de los medios productivos, la capacidad de los mismos y la reorganización de los sistemas.

1. Introducción

En las últimas décadas hemos asistido a un importante incremento del uso de materiales compuestos en diferentes sectores avanzados tecnológicamente, especialmente el aeronáutico [1].

Dentro de los composites destacan aquellos formados por fibras junto a matriz polimérica termoestable, como pueden ser las resinas epoxídicas. La conjunción de fibras de carbono y epoxi (CFRP o Carbon Fiber Reinforced with Plastics) resulta de especial interés por su multitud de usos [2].

Los procesos de fabricación con materiales compuestos de matriz termoestable implican un alto componente de operaciones manuales, inspecciones de la totalidad de las piezas y superficies y re-trabajos, si bien se están automatizando cada vez más la elaboración de los elementos más grandes.

La difícil situación tras la Segunda Guerra Mundial llevó a la industria japonesa a la búsqueda de la optimización de los medios de producción y consumo de materia prima. Taiichi Ohno, ejecutivo de Toyota, fue el gran valedor de la lucha contra el mal uso de los recursos. Identificó siete tipos principales de despilfarro (muda) [2]. Womack y Jones [3] popularizaron el término Lean para referirse a la generalización del sistema de gestión de Toyota para la producción, diseño, calidad, soporte a ventas...

El presente documento pretende establecer algunos puntos de partida para establecer pautas de investigación aplicadas en la viabilidad del empleo de Lean a la fabricación de elementos con material compuesto de matriz termoestable.

2. La fabricación Lean

La filosofía *Lean* pretende la eliminación de actividades que no aporten valor al proceso productivo mediante la aplicación de cinco conceptos: determinar el valor, identificar la cadena de valor de manera completa, emplear la producción en flujo, dejar que las necesidades tiren de la producción y la mejora continua.

El desarrollo de conceptos Just In Time (JIT) en Toyota puso a esta compañía como símbolo de la excelencia en el sector. Durante décadas se ha ido desarrollando e implementado herramientas dentro y fuera de la propia Toyota para la consecución de los objetivos identificados por Lean. El sistema de producción de Toyota (TPS) [2] y la filosofía Lean son, básicamente, lo mismo [3]. Quizás los autores Lean [3] se centren más en la filosofía conceptual del sistema a todas las actividades de las empresas y el TPS se ha descrito en base a las herramientas aplicadas al sistema productivo. Estas herramientas, están orientadas a conseguir una producción nivelada y a la mejora continua.

Las herramientas Lean ha sido empleadas convencionalmente dentro de la mejora continua de la calidad, independientemente de si la planta funciona bajo premisas Lean o se basa en modelos de lotes y colas. Las herramientas Lean o TPS, tales como 5S, gestión visual, Six Sigma... son confundidas frecuentemente con el propio sistema Lean. Los verdaderos sistemas Lean se basan en la eliminación de inventarios y en el flujo de una sola pieza.

La fabricación celular va íntimamente ligada a la fabricación Lean y suele ser el primer paso que se acomete puesto que, el conseguir una producción basada en el flujo de una sola pieza, hace reducir los colchones de los inventarios obteniendo mejoras y beneficios a corto plazo

que apoyaran la consecución de los objetivos de las siguientes fases de implementación de Lean. No hay que confundir fabricación celular con Lean, una compañía que fabrique bajo de fabricación celular puede no ser nada Lean.

Las principales aportaciones de Lean son la proposición de eliminación de muda y la identificación completa de la cadena de valor. La herramienta Value Stream Mapping (VSM) puede considerarse como la piedra angular de Lean [4], pero para su aplicación a la cadena de valor completa y no sólo a la parte de la que se tiene control. La extensión de la iniciativa Lean aguas arriba, hacia nuestros proveedores, es uno de los grandes pilares del éxito Lean.

La fabricación Lean promueve sistemas de control de la producción simples de tipo pull tales como kanban y heijunka. Los sistemas complejos de la producción tipo Material Requirement Plannig (MRP) son todo lo contrario de lo que promueve la filosofía Lean [3].

El beneficio a largo plazo de Lean es la rentabilidad del proceso de fabricación, aunque no es una receta milagrosa. Lean no supone es la solución para un proceso totalmente fuera de costes o estratégicamente equivocado [3].

La reducción de inventarios y el flujo de una sola pieza de las empresas Lean las ha conducido a la reducción de su Lead Time y de los defectos del producto final [2][3][4].

Los agentes del cambio en empresas de otros sectores han, tradicionalmente, provenido de las empresas del sector automovilístico [3] que siguieron con éxito los pasos de Toyota. Fuera de este sector ha habido casos de éxito pero también de fracaso.

3. Los procesos de fabricación con materiales compuestos de matriz termoestable

Un material compuesto es la unión de una resina o matriz (denominada también fase continua o material ligante) con otro material de mayor resistencia hecho de fibras (denominado también fase discontinua o material reforzante. Entre ambos materiales no se produce reacción química alguna. [5]

Las fibras aportan al material alta resistencia, rigidez y dirigen el comportamiento mecánico de los materiales compuestos dependiendo de las orientaciones de fibra que se dispongan. La matriz aporta fabricabilidad y protege a las fibras del medio ambiente y de los elementos mecánicos externos además de transmitir las cargas. También determina la temperatura de servicio del material compuesto.

Las combinaciones de tipos de fibra: carbono, aramidas (KevlarTM), SiC, vidrio, boro... y de matrices: poliméricas, metálicas, cerámicas...

son múltiples. Las más empleadas junto a las fibras de carbono son las basadas en materiales poliméricos que requieren unas temperaturas de conformado moderadas respecto, por ejemplo, a los metales, además de su ventaja en peso.

Las fibras de más interés comercial son suministradas en formatos preimpregnados de resina de epoxi precurada. Estas presentaciones, como tejidos o hilo, facilitan los procesos automatizados de apilado, incrementan la calidad de los elementos obtenidos y reducen los costes de conformado [5].

Adicionalmente, se emplean núcleos de otros materiales, como fibra de vidrio y aleaciones de aluminio para rigidizar los elementos laminados con poco peso adicional.

Se están fabricando cada vez más elementos compuestos por varias piezas curadas y encoladas o piezas cocurados frente a otros tipos de uniones [6]. Este tipo de ensamblajes supone una mejora de los procesos productivos, del rendimiento mecánico de las uniones y del peso total de los elementos frente a otros sistemas de unión como el remachado.

La fabricación de elementos en fibra de carbono está muy orientada a sectores avanzados tecnológicamente y con una cadencia de producción baja o media. Especialmente, es significativo el caso del apilamiento manual, con un muy elevado componente de coste relacionado con la mano de obra, que resulta viable para estas cadencias bajas, piezas pequeñas y de automatización complicada. Los procesos de apilado manual se presentan como un proceso artesanal y con escasa división del trabajo. La inserción de núcleos y el empleo de adhesivos y cocurados también se suele realizar de manera manual [6].

La caducidad de los materiales, acrecentada a temperatura ambiente, implica un control logístico de los mismos durante todo el proceso y marca claramente que las operaciones de entrada y salida de las cámaras frigoríficas y los registros asociados son operaciones que no aportan valor. Los procesos de apilado de fibra, por los requerimientos de calidad y por la circunstancia de que no todas las propiedades se pueden inspeccionar mediante Ensayos no Destructivos (END) están altamente estandarizados y en el caso del sector aeronáutico se trata de procesos y de personal certificados. Esta alta estandarización es uno de los pilares establecidos por Lean como base del sistema y debe facilitar su implementación [3]. La recepción técnica, la conservación y la logística asociada a los preimpregnados empleados en el apilado, así como a la producción en curso y los kits de elementos cortados, suponen un importante esfuerzo de actividades de ningún valor añadido.

Los procesos de conformado pueden dividirse fundamentalmente en aquellos que emplean fibras pre-impregnadas o aquellos que emplean fibras secas y resinas aplicadas de manera independiente [6]. Tienen fundamentalmente cuatro fases: una fase de preparación de elementos, otra de apilado de tejidos, una tercera de consolidación y una cuarta de curado. Existen múltiples combinaciones de tecnologías en estas cuatro fases siendo la fase de curado la menos propensa a posibles automatizaciones. Adicionalmente se pueden requerir procesos finales de recantado, sellado de bordes y pintura.

El apilado de los materiales se realiza fundamentalmente sobre un útil de conformado mediante procedimientos manuales o automáticos. Para evitar el corte manual de las telas se implementan sistemas de corte por control numérico. Esto puede suponer un aumento en el stock de kits de materiales precortados y embolsados pero también supone una importante mejora en la productividad y ahorro de material preimpregnado.

La consolidación de los materiales (fibras y resina) se realiza mediante la aplicación de presión de manera manual, con bolsas de vacío para compactado, prensas o mediante el empleo de sistemas automatizados de aplicación de preimpregnados que llevan dispositivos para aplicar la presión adecuada en cada punto del elemento tales como tecnologías de apilamiento de cinta (Automatic Tape Layup) o colocación de fibra (Fiber Placement) para las superficies más grandes. También para obtener preformas se están empleando Braiding y Filament Winding. A pesar del incremento de productividad y calidad que han supuesto estas tecnologías cada elemento todavía tiene un gran componente de trabajo manual en el apilado de elementos y en el montaje, desmontaje y preparación de utillajes.[6]

El curado de los elementos de epoxi se realiza con temperatura y presión mediante el empleo de autoclaves aunque también pueden emplearse prensas, hornos y bolsas de vacío. En los CFRP la combinación habitual suelen ser bolsas de vacío para curado junto al empleo de autoclaves. Las autoclaves implican importantes inversiones y tradicionalmente se han realizado lotes para el curado de las piezas medianas y pequeñas.

Los principales defectos de calidad de los elementos son las porosidades y delaminaciones y el posicionamiento erróneo de las fibras. Las fibras preimpregnadas permiten mejores niveles de calidad que los procedimientos con tejidos secos. Las porosidades y delaminaciones se detectan mediante el empleo de sistemas ultrasónicos o radiográficos, generalmente, del

100% de las superficies y la producción. Los defectos de orientación de urdimbres no son detectables mediante END. La automatización también está teniendo cada vez más presencia en los sistemas de inspección de calidad mediante el empleo de sistemas de control numérico [6].

4. Los sistemas de fabricación con material compuesto

Mediante el estudio de casos de empresas de tamaño pequeño y grande dedicadas a la fabricación con material compuesto dentro del sector aeronáutico se han extraído unas primeras consideraciones que pueden resultar útiles como punto de partida

La organización de las plantas de fabricación estudiadas (ver ejemplo Figura.1) están básicamente orientadas por talleres con poca percepción de trabajo en flujo. Se realizan bastantes movimientos de piezas semiterminadas, terminadas y de utillaje. Las piezas de composite tienen grandes propiedades estructurales en relación a su peso y de vida en fatiga pero no son demasiado buenas en relación a su resistencia al impacto. Por lo tanto, excesivos movimientos incrementan el riesgo de golpes y de posteriores trabajos de reparación de los elementos.

La distribución en planta y el sistema productivo se ha orientado a la maximización del uso de los activos de más alto coste: las máquinas de apilado, las de corte, las autoclaves y el sistema de acondicionamiento de la zona limpia. Habría que plantear la posibilidad de articular distribuciones en planta alternativas con máquinas más pequeñas y más numerosas, almacenamientos frigoríficos más pequeños y menos centralizados y posiblemente con áreas limpias estructuradas de otra manera. Este debería ser el comienzo de la implementación Lean y no el empleo de técnicas aisladas [3].

El flujo de valor está altamente fragmentado. Son habituales las salidas de componentes para realizar un proceso externo tal como pintura, algún montaje manual, inspecciones de calidad... Estas operaciones rompen la cadena de valor en incluyen en el proceso costes de transporte y un pensamiento por lotes. De la misma manera las plantas tienden a externalizar la producción y suministro JIT de los elementos más pequeños tales como telas y núcleos cortados. Que estos elementos se suministren JIT no implican que haya flujo puro, simplemente los proveedores funcionan con un supermercado de productos aprovechando que estos tienen unos costes estructurales sensiblemente menores. Podría resultar conveniente realizar VSM de la cadena de valor

completa y no limitarse a transferir costes a los proveedores [4].

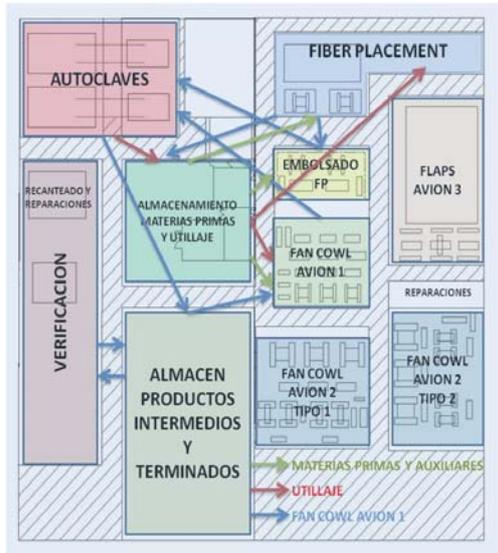


Figura 1. Ejemplo de distribución en planta y flujos de fabricación de un elemento complejo con fibra de carbono.

En las plantas estudiadas se emplean técnicas Lean, gestión visual, housekeeping, cambio rápido de utillaje, proyectos de mejora ligada a funciones Lean... bajo la premisa clara que la mejora de la calidad implica una mejora evidente de la productividad y que los retrabajos son costosos y dificultan el flujo [7]. A pesar de emplear algunas técnicas Lean, no pueden considerarse como sistemas productivos Lean puesto que no siguen principios básicos como el flujo y el control de fabricación pull [2][3].

El sector de la automoción, origen de Lean, y los habituales en la fabricación de composites son diferentes. Aunque hay autores que defienden la implementación pura de Lean como válida en cualquier sector, para otros también es necesario revisar estos preceptos y adaptarlos [3].

5. Aproximación a líneas de investigación

Lean puede resultar una herramienta válida para la optimización de los sistemas de conformado de material compuesto pero quizás sea más determinante, y con mayor impacto en la reducción de inventarios, la implementación de la fabricación celular.

Algunas posibles líneas de investigación son:

- Analizar la aplicabilidad general de las técnicas *Lean* incluyendo la misma dentro de planes de mejora o desde la propia concepción del diseño de los sistemas, incluyendo la distribución en planta y el dimensionado del equipamiento.
- Estudiar como las nuevas tecnologías de los procesos de fabricación en este campo pueden apoyarse en las técnicas *Lean* y permitir un aumento de la productividad.
- Proponer un sistema que permita estimar y evaluar las mejoras producidas por los cambios en el sistema de fabricación.

6. Referencias

- [1] C. Soutis, *Progress in Aerospace Sciences*, 41. 2005 pp 143-151.
- [2] T. Ohno, *The Toyota Production System: Beyond Large Production*, Productivity Press, 1988.
- [3] J. Womack and D.T Jones. "Lean Thinking", *Gestión 2000*. 2005.
- [4] I. Serrano Lasa, *Análisis de la aplicabilidad de la técnica VSM en el rediseño de sistemas productivos*, Tesis Doctoral, Universidad de Girona, 2007.
- [5] D.L. Chung, "Carbon Fiber Composites", Butterworth-Heinemann, 1994.
- [6] Campbell F.C., "Manufacturing Processes for Advanced Composites", ELSEVIER B.V., 2003.
- [7] SISTEPLANT AIRBUS Illescas. *Lean Manufacturing en procesos SCAVA*, SISTEPLANT News, Diciembre 2007, pp. 1

Identificación y recuperación de textos paralelos en la web

E. Yráyoz Díaz de Liaño⁽¹⁾, A. Tomeu Hardasmal

⁽¹⁾Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz
Universidad de Cádiz, calle Chile nº 1, 11002 Cádiz

Teléfono 9560-015295, e-mail: eloisa.yrayoz@uca.es

Resumen

Este trabajo presenta el estudio desarrollado con la finalidad de buscar textos paralelos a través de la web. Existe actualmente poca bibliografía científica publicada en este campo. Nuestro trabajo ha estado enfocado en dos líneas principalmente: señalar las características que permitan identificar textos paralelos y en segundo lugar recuperar dichos textos en la web.

1. Introducción

Entre las líneas de investigación actuales donde las ideas nuevas para la web tienen presencia destacamos los siguientes dominios: comercio electrónico, gestión del conocimiento corporativo, búsqueda de información en la web, librerías digitales [17].

Un campo de estudio muy interesante y con muchas ramas establecidas está en el mundo de los buscadores. Nuestra visión particular es que la tecnología de la generación actual de buscadores está muy limitada. Para ser capaz de gestionar de forma óptima el continuo crecimiento de la www (en tamaño, lenguajes y formatos), sería necesario explorar información nueva. Es preciso recordar que uno de los grandes problemas a que nos enfrentamos hoy día es la sobrecarga de información y al enorme tamaño de la web [13]. Desde el punto de vista de un sistema de búsqueda este problema afecta a la gran cantidad de páginas que debe recorrer para poder tener un subconjunto lo suficientemente grande del que poder extraer información relevante de ellas, lo que genera procesos muy costosos en el tiempo. A ello se le une el dinamismo de la web, por lo que los procesos que extraen la información deben estar constantemente buscando cambios en la información, así como la aparición de nuevas páginas.

Atendiendo a lo anterior y al gran tamaño y dinámica de la web un buscador tiene que resolver una serie de problemáticas relacionadas con el número de páginas que se descargará, la frecuencia con la que refrescará dichas páginas, la manera de minimizar la carga de los sitios web de donde descarga dichas páginas así como si podría paralelizar las tareas de manera que se gane en eficiencia, consiguiendo de este modo garantizar un

resultado óptimo, en tiempo y en resultados, a petición de un usuario o grupo de usuarios.

En el mundo de los buscadores se pueden encontrar numerosos productos [27]. Por ejemplo además de los buscadores “clásicos” existen “buscadores de buscadores”, donde es posible emplear agentes inteligentes que son capaces de responder a las preguntas específicas que les formulamos. También podemos emprender un reconocimiento inteligente de fuentes de información, e identificar el “estado del arte” de determinados temas de investigación, consultando los textos que expertos en el tema de nuestro interés han publicado en sitios web temáticos. En ocasiones es indispensable extender nuestra búsqueda a través de la “Web Invisible” (región de la web a la que no pueden acceder los buscadores), pues no toda la información que se encuentra publicada en la web es posible consultarla a través de los buscadores convencionales.

Como se observa, existe un amplio abanico de modelos de recuperación de información, como así mismo existen un gran número de motores de búsquedas cada uno con finalidades idénticas o con objetivos distintos pero hemos detectado que hay un espacio casi vacío en el desarrollo de motores de *búsquedas para localizar textos paralelos en la Web*. [18]. Los textos paralelos son textos que tienen el mismo contenido semántico, pero expresado en lenguajes diferentes

De los trabajos consultados sobre motores de búsqueda de textos en la red, muy pocos hacen referencia al capítulo de textos paralelos [18][21][25]. Por otra parte no hemos encontrado referencias sobre el porcentaje que suponen estos textos sobre el total de los documentos electrónicos publicados, y causa inquietud que siendo una base documental de

estudio tan importante para el desarrollo de diversas líneas de trabajo, sea un campo tan inexplorado. Los textos paralelos [16] son un recurso utilizado en numerosas líneas de investigación y con distintos objetivos de aplicación, entre otras podemos destacar las siguientes: Alineación de corpus paralelos, enseñanza de segundas lenguas, didáctica de la traducción, lexicografía y terminología, traducción automática edición plurilingüe, internet multilingüe.

Salton [22] fue uno de los primeros autores en plantearse el problema de encontrar documentos escritos en un idioma diferente al de la consulta y propuso la utilización de un tesoro bilingüe para las lenguas que el considero: el alemán y el inglés. Los resultados que obtuvo fueron tan interesantes como los alcanzados en experimentos de búsqueda monolingüe, en gran parte debido a que su tesoro se confeccionó a mano en un intento de eliminar todo problema de ambigüedad. Esto hizo que la correspondencia entre términos se considerara casi perfecta.

La localización de textos paralelos en la web está orientada actualmente a la construcción de grandes corpus paralelos [3][9][16][18], pero existen muy pocos grupos de trabajo que hayan publicado sus investigaciones sobre la recuperación de textos paralelos individuales en la web.

En la investigación que desarrollamos nosotros tenemos como objetivo final, localizar **un texto paralelo en la Web a partir de un texto patrón origen**.

2. Metodología Experimental

Nuestro modelo de trabajo ha estado enfocado en dos líneas distintas aunque muy relacionadas: identificar textos paralelos y recuperar dichos textos en la web.

La primera línea de trabajo tiene como objetivo identificar las características que permitirán discriminar unos documentos frente a otros.

2.1. Identificación de textos paralelos: Los documentos web pueden ser datos sin estructurar, archivos *html* parcialmente estructurados, o información procedente de bases de datos generadas en páginas con formato *html*. Estos documentos hipertexto incluyen texto y también imágenes, audio, vídeo, metadatos e hiperenlaces.

El formato de documentos que se ha seleccionado para trabajar ha sido *html* y las características a buscar estarán relacionadas en gran parte con dicho formato.

Los documentos utilizados han sido seleccionados de la base de datos documental

del Parlamento Europeo [26]. Se ha trabajado con cinco lenguas distintas: inglés, francés, alemán, italiano y español. Estos documentos seleccionados son todos textos multilingües, es decir, es decir el mismo documento aparece traducido en las cinco lenguas antes citadas.

En un primer lugar se dividió a todo documento en dos partes: cabecera de documento y cuerpo de documento. Nuestras líneas de trabajos van a estar enfocadas a un estudio independiente de cada una de las partes del documento.

2.1.1. Estudio cabecera de documento

Para trabajar en esta línea nos hemos apoyado en los trabajos previos que realizan análisis estadísticos en alineación de sentencias [4] [11] [18] [19] [21].

Las investigaciones sobre alineación de textos siguen tres corrientes: **Corriente lingüística** [23][14], **Corriente estadística** [5][11] y **Corriente híbrida** [6]. Después de evaluar las distintas propuestas nos hemos decantado por la corriente estadística con el objetivo de incorporar rapidez en nuestro buscador. Aunque en todas las cabeceras de los documentos seleccionados sus títulos van acompañados de otros campos como son: fecha de publicación del documento, autor/es, y comisión que presenta al documento, nosotros hemos seleccionado únicamente el campo título pues es el único obligado de aparecer en todos los documentos.

En el estudio estadístico de los títulos de los documentos se ha trabajado con dos propuestas de variables: los caracteres y las palabras de los títulos. Se han realizado ambos estudios estadísticos [15] y se han obtenido los modelos de regresión lineal que se ajustan a ambas propuestas.

Como ejemplo en la figura I se muestra el ajuste que existe entre los caracteres de los títulos de los documentos en alemán y los caracteres de los títulos de los documentos en español

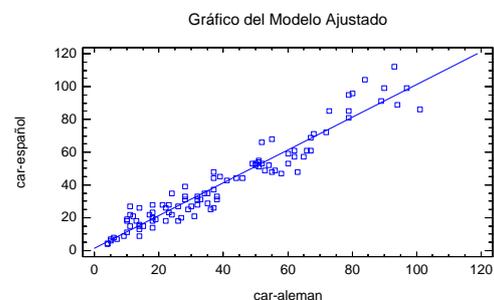


Figura I. Gráfico modelo ajuste caracteres alemán-español

Todos los modelos construidos en este apartado dieron un ajuste muy similar al de la figura I.

La segunda parte de la identificación de textos paralelos aporta el estudio del cuerpo del documento.

2.1.2. Estudio cuerpo de documento

La mayoría de los autores [6][18][25] que trabajan identificando textos paralelos han realizado estudios estadísticos del cuerpo del documento donde han buscado principalmente la correspondencia entre el peso de los documentos, correspondencia entre el número de párrafos que presentaba cada documento y el coeficiente de correlación entre los caracteres de dichos párrafos.

Nuestro trabajo sobre el cuerpo del documento ha tenido dos enfoques distintos: un estudio de datos estadísticos del documento y un estudio de las etiquetas *html* que forman parte del documento [10] [18].

En el estudio estadístico se han evaluado distintas variables del cuerpo del documento pero definitivamente solo se ha seleccionado el parámetro peso del documento y se han construido los modelos de regresión lineal que se ajustan al peso que tiene cada par-idioma de documentos.

Para seleccionar las etiquetas *html* [10] que nos ayudarán en la discriminación de documentos se han construido distintos programas en lenguaje Perl. Dichos programas al ser ejecutados en nuestra base documental nos ha permitido seleccionar aquellas etiquetas que participaran en nuestra herramienta definitiva.

2.2. Recuperación de textos paralelos en la web:

Una vez terminado el estudio estadístico y estructural de los documentos nuestro siguiente paso consiste en recuperar el texto de la web.

El objetivo a conseguir es que nuestra herramienta cumpla dos condiciones básicas: que sea veloz en la búsqueda y que sea “casi” exacta en la respuesta, considerando una respuesta exacta cuando nuestra herramienta nos devuelva un único documento.

Actualmente existen funcionando muy buenos motores de búsqueda y hemos considerado por tanto realizar la construcción de una *webcrawler*[28] donde se aprovechen los recursos existentes en la web.

Antes de construir nuestra *webcrawler* se han realizado numerosas pruebas en nuestra base documental para seleccionar los elementos que iban a participar en nuestra herramienta.

Actualmente se está construyendo una *webcrawler* en Java donde participan los siguientes elementos: los modelos de regresión lineal que trabajan con los caracteres de los títulos (se han eliminado los modelos lineales de las palabras de los títulos), los modelos de

regresión lineal que trabajan con el peso del cuerpo del documento (se han eliminado otros modelos estadísticos estructurales) y las marcas *html* seleccionadas en el apartado anterior.

3. Resultados y Discusión

En las distintas secciones que teníamos dividido nuestro trabajo actualmente nos encontramos en la siguiente situación:

- √ Se han construido los modelos de regresión lineal que participarán en la identificación de la cabecera de los documentos
- √ Se han construido los modelos de regresión lineal que participarán en la identificación del cuerpo del documento
- √ Se han seleccionado las marcas *html* mejores para la discriminación de los documentos
- √ Se ha construido un prototipo básico para trabajar en nuestra base documental.

Actualmente nos queda por realizar dos fases:

- La primera fase es la construcción de nuestra *webcrawler* para la localización de los documentos y es la fase en la que actualmente estamos inmerso.
- La segunda fase es la ejecución de la *webcrawler* para obtener conclusiones definitivas.

6. Referencias

- [1] Aswani, N.; Gaizuskas,R.; “Aligning works in English-Hindi parallel corpora”, *Proceeding of the ACL 2005 Workshop on Parallel Text*, pp.115-119, Año Junio 2005.
- [2] Berners-Lee, T.; Henderl, J.; Lassila,O. “The semantic Web; a new form of Web content that is meaning ful to computers will unleash a revolution of new possibilities”. *Scientific American*, May. Año 2.001.
- [3] Barlow, M. (2002). “ParaConc: Concordance software for multilingual parallel corpora”. *Language Resources for Translation Work and Research*. 20-24.
- [4] Brown, P., Cocke, J.,Della Pietra,S., Della Pietra,V. “A statistical approach to machine translation”. *Computacional Lingüistics*, 16(2): 79-85 Año 1.990
- [5] Brown,P., Lai,J., Mercer,R.; “Aligning Sentences in Parallel Corpora”. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Berkeley, California. Año 1.991
- [6] Chen,S. “Aligning Sentences in Bilingual Corpora Using Lexical Information” *In Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computational Linguistics (ACL’93)* 9-16.Año 1.993

- [7] Chen, J. Chang, J., Sheng, H.; “Word Sense Disambiguation using a Bilingual Machine Readable Dictionary”. *Natural Language Engineering*. Año 1.997.
- [8] Chen, H., Huang, S. Ding, Y, Tsai, S.; “Proper Name Translation in Cross-Language Information Retrieval”. *Proceeding of the 17th International Conference on Computational Linguistics (COLING’98) and 36th. Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL’98)*, 232-236. Año 1.998.
- [9] Chen, Jiang and Jian-Yun Nie. “Parallel Web text mining for cross-language information retrieval”. In *Recherché 'Information's Assisted par Ordinateur (RIAO)*, pages 62–77, Paris, April. Año 2.000.
- [10] Cutler, M.; Shih, Y.; y Meng, W.; “Using the Structure of HTML Documents to Improve Retrieval”. In *USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*. Año 1.997.
- [11] Gale, W.; Church, K.; “A program for aligning sentences in bilingual corpora”. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Berkeley, California. Año 1.991
- [12] Gale, William A. and Kenneth W. Church. “Identifying word correspondences in parallel texts”. In *Fourth DARPA Workshop on Speech Asilomar, CA*, February. Año 1.991
- [13] [Gull05] Gulli, A.; Signorini, A.; “The indexable web is more than 11.5 billions pages”. In *WWW2005: Proceedings of 14th International World Wide Web Conference*. ACM Press.
- [14] Matsumoto, Y. Ishimoto, H. Utsuro, T.; “Structural matching of parallel texts”. *Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, ACL’93*. 23-30. Año 1.993
- [15] Montgomery, D.C.; Peck, E.A.; “Introduction to linear regression analysis”. John Wiley and Sons, 3rd edition, Año 2001.
- [16] Nevill, C.G., & Bell, T.C., (1992). “Compression of Parallel Texts”. *Information Processing and Management*, Great Britain: Pergamon Press. 28(6), 781-793.
- [17] O’Neill, E. T. ; Lavoie, B. F. ; y Bennett, R. ; « Trends in the evolution of the public web.” 1998-2002. 2(4). Año 2.002.
- [18] Resnik, P. “Mining the Web for bilingual text”. In *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the ACL*, pages 527–534, College Park, MD, June. Año 1.999.
- [19] Resnik, P.; Olsen, M.; Diab, M.. “The Bible as a parallel corpus: Annotating the <Book of 2000 Tongues>”. *Computers and the Humanities*, 33:129–153. Año 1.999.
- [20] Resnik, P.; Oard, D.; Levow, G. “ Improved cross-language retrieval using back off translation”. In *Proceedings of the First International Conference on Human Language Technology Research (HLT-2001)*, pages 153–155, San Diego, CA, March. Año 2.001.
- [21] Resnik and Smith. “The Web as a Parallel Corpus. Evaluating translational correspondence using annotation projection”. In *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, pages 392–399, Philadelphia, July. Año 2002.
- [22] Salton G. “Automatic Processing of Foreign Language Documents”. *Journal of American Society for Information Sciences*, 21 187-194. Año 1970.
- [23] Sadler, V. “The Textual Knowledge Bank: design, Construction, Applications”. *Proceedings of the International Workshop on Fundamental Research for the future Generation of Natural Language Processing, (FGNLP)*, 17-32, Kyoto, Japan. Año 1.991
- [24] Simões, A.M.; Almeida, J.J.. “NATools: A Statistical Word Aligned Workbench” . *Procesamiento del Language Natural*, 31:217-224. Año 2003.
- [25] Xiaoyi, M. ; Liberman. M. “Bits: A method for bilingual text search over the Web”. In *Machine Translation Summit VII*, September. Año 1.999
- [26] <http://www.europarl.europa.eu/>
Parlamento Europeo
- [27] <http://www.botspot.com>
Listados de robots en la web, link, artículos y bibliografías
- [28] <http://www.robotstxt.org/wc/robots.html>
“The Web Robot Pages” Martijn Koster

Influencia de las sordinas en la respuesta en frecuencia del violín

J.M. Cuevas Romero, M.A. Salvá Cárdenas

Laboratorio de Acústica y Vibraciones, CASEM, 616071264, jose_cuevasro@hotmail.com.

Resumen

En el presente artículo vamos a analizar cómo afecta a la respuesta de un violín el colocarle diferentes tipos de sordinas. Para ello, vamos a obtener, en primera instancia, la respuesta en frecuencia del violín sin sordina. Posteriormente, iremos colocando los diferentes tipos de sordinas, obteniendo las respuestas en frecuencias correspondientes. Una vez obtenidas, compararemos resultados; tras lo cual establecemos las conclusiones.

1. Introducción

A lo largo de la historia se han llevado a cabo numerosos experimentos, por científicos interesados en la acústica musical, y luthieres, sobre el violín (brevemente desarrollado en el anexo I). El objetivo principal que definía los estudios que se realizaban era determinar a través del método científico, qué fue lo que hicieron, de forma empírica, los considerados mejores luthieres de la historia: Antonio Stradivari y Guarneri “de Gesu”, para conseguir la mejor sonoridad del violín lograda a lo largo de todos los tiempos. Éstos fueron los violines que se consideraron como patrones y, por lo tanto, objeto de copia por otros muchos luthieres posteriores.

Es bien conocida, por científicos y luthieres, la importancia que tiene la caracterización de la respuesta en frecuencia de materiales acústicos, tanto instrumentos musicales completos como partes de ellos. Las propiedades vibracionales de sistemas mecánicos son ampliamente descritas por la posición y características de las resonancias que se observan en los gráficos de respuesta en frecuencia. Sus propiedades son importantes en numerosos campos, incluidos la ciencia de materiales, la acústica y en particular acústica musical, e incluso la robótica. Sin embargo pocos luthiers hacen uso de estos principios de física experimental, entre otras razones, por el alto coste y la dificultad de uso, debido a los conocimientos que requiere.

Hoy en día, gracias a diferentes estudios podemos considerar que se conoce de forma más o menos precisa la respuesta en frecuencia de los violines, ya que ésta es distinta en función de la calidad del violín, y además hay que tener en cuenta que cada violín es distinto. Sin embargo, a pesar de que se han hecho numerosas investigaciones por muchos investigadores, mucho de ellos de gran prestigio, vinculadas al violín, no se han hecho

estudios de la influencia que tiene la colocación de la sordina en el puente sobre el sonido que emite el violín. Por lo tanto, esta va a ser nuestra mayor apuesta, el determinar que modificaciones se producen en el espectro del violín en algunas de las sordinas más empleadas por violinistas de todo el mundo.

La realización de los ensayos se realiza en el Laboratorio de Acústica de la Universidad de Cádiz, bajo la supervisión de profesores de la misma universidad, y con la colaboración de Jorge Fernández de Brüel & Kjaer.

2. Metodología Experimental

Los instrumentos, sistemas y complementos que vamos a emplear en el ensayo son los siguientes:

1. Un violín
2. Un martillo de impacto
3. Un acelerómetro
4. Un preamplificador / convertidor
5. Un sistema de adquisición de datos
6. Cables
7. Software Pulse de Brüel & Kjaer.
8. Sordinas

El violín que vamos a utilizar es de fábrica, y de una calidad baja, adecuado para las enseñanzas elementales de violín.

La instrumentación que vamos a utilizar para la cadena de medida es de la marca Brüel & Kjaer. Tanto el martillo de impacto como el acelerómetro que vamos a utilizar necesitan tener colocados entre el sistema de adquisición de datos y estos un convertidor preamplificador. Los modelos que empleamos son: para el martillo, el modelo 8202, el cual lleva incorporado un transductor de fuerza que nos va a permitir conocer qué impulso va a ser el que se va a transferir al sistema. El acelerómetro se

corresponde con el modelo 4384. Ambos casos, martillo y acelerómetro, se conectarán al front – end a través del convertidor preamplificador 2647A. El front – end que utilizamos es el modelo 3560C, un modelo de PULSE portátil, el cual está constituido por el módulo de comunicación modelo 7533 y, por el módulo de entrada / salida 3109. Por último, el cable que vamos a emplear se caracteriza por ser un cable de bajo ruido, lo que nos va a permitir reducir su influencia en las señales obtenidas. Todo el material utilizado para el experimento procede de Brüel & Kjaer.

Las sordinas que vamos a utilizar son los modelos Tourte de ébano con forma de peine, Tourte de goma con forma de violín y modelo de peine de goma.



Figura 1. Sordinas para violín Tourte de ébano con forma de peine, Tourte de goma con forma de violín y modelo de peine de goma respectivamente

A la hora de determinar la validez de la instrumentación utilizada se ha tenido en consideración, tomando como referencia experimentos previos, el rango de frecuencias sobre el cual vamos a centrar nuestro análisis, el cual va a ser desde 100 Hz hasta 3kHz. Ahora bien, es importante tener en cuenta que el rango de frecuencias que, por ejemplo en el caso del martillo utilizado, según las especificaciones llega hasta 7 kHz. Sin embargo, este rango es para el caso de aplicar el impulso en una placa de acero, de distinta constitución al sistema donde vamos a aplicar el impulso en nuestro ensayo. Aspectos de semejante consideración es importante tenerlos en cuenta a la hora de seleccionar la instrumentación.

El tipo de ensayo que vamos a realizar va a ser un ensayo de impacto, tal como puede deducirse de la instrumentación utilizada.

En la excitación que vamos a aplicar al ensayo, se va a realizar en el perfil izquierdo del puente y se ha de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Debe generarse suficiente energía en el rango en frecuencia.
2. La fuente de excitación se debe colocar tan próximo como sea posible al lugar donde se sujetan las cuerdas al puente.
3. La parte principal de la energía de excitación se debe transmitir al puente

en la misma dirección que la fuerza ejercida cuando un violín es tocado con el arco.

4. La señal de excitación se debe medir, o en su defecto, debe ser conocida.

Con objeto de que la excitación sea lo más homogénea posible, es decir, que la energía puesta en juego en el golpe sea siempre más o menos pareja, emplearemos un pie de laboratorio, al cual instalaremos un elemento accesorio que nos permitirá utilizar el martillo como si se tratase de un péndulo, de forma que al colocar el martillo, éste pueda girar libremente. Posteriormente, intentaremos que el ángulo de abertura del martillo con respecto a la perpendicular sea siempre el mismo.

Además, con objeto de asegurarnos que excitamos todas las frecuencias que puedan ser de interés, la punta del martillo que emplearemos será la de acero.



Figura 2. Mecanismo utilizado para aportar coherencia a los impulsos aplicados sobre el puente del violín

La instalación del acelerómetro consistirá en pegar un pequeño trozo de papel celo en el lugar donde pretendemos colocarlo. Para sujetarlo emplearemos una “gomilla”, la cual pasará a su través, estando sus extremos sujetos a las puntas inferiores de las C. Consecuentemente, el acelerómetro queda instalado a presión sobre la superficie del violín. Ésta será, a su vez, suficiente para que no se mueva cuando se produzca el impacto del martillo sobre el perfil del puente. El lugar del violín en el cual vamos a colocar el acelerómetro viene definido por la abundancia de líneas nodales. Cuando obtenemos por interferometría cómo se distribuyen observamos esto ocurre en las proximidades de el pie de apoyo izquierdo del puente.



Figura 3. Instalación del acelerómetro en la tapa del violín

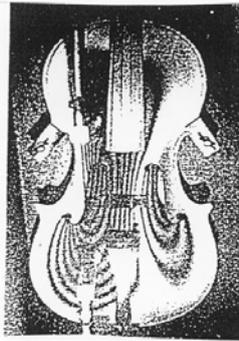


Figura 4. Vibraciones de la tapa armónica en la resonancia fundamental de un violín fotografiado mediante interferometría (rigidamente amortiguado en las esquinas superiores de las C y en la mentonera (Jansson, Molin y Sundin)

De las pruebas realizadas, concluimos que el intervalo (span) de frecuencias que vamos a seleccionar para la FFT es de 3.2 kHz. Por otro lado, la cantidad de líneas que utilizemos nos va a proporcionar la resolución que vamos a tener en el espectro de frecuencias. Por ello emplearemos 6400 líneas, lo cual nos dará muy buena resolución. En cuanto al promediado, vamos a emplear un promediado lineal, empleando 10 medias. El tipo de ventana que se va a emplear es la ventana uniforme, tanto para la FFT de la señal procedente del acelerómetro como del transductor de fuerza que se encuentra instalado en el martillo de impulso.

Otra característica importante que se ha considerado a la hora de tomar las medidas es aplicar un disparador, cuyas características son las siguientes:

- Slope: Positive
- Level: 15 % del nivel de referencia, es decir, 1,061 N
- Hysteresis: 0,01% del nivel de referencia, es decir, 707,1 uN
- Hold off: 1ms
- Divider: 1
- Delay: 0

- Nivel de referencia: 7,071 N

3. Resultados y Discusión

A continuación presentamos las respuestas en frecuencia para los diferentes casos, con sordinas y sin sordinas, así como la obtenida para la señal procedente del transductor de fuerza.

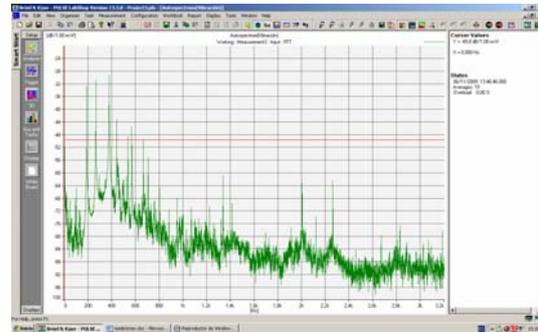


Figura 1. Respuesta en frecuencia del violín sin sordina.

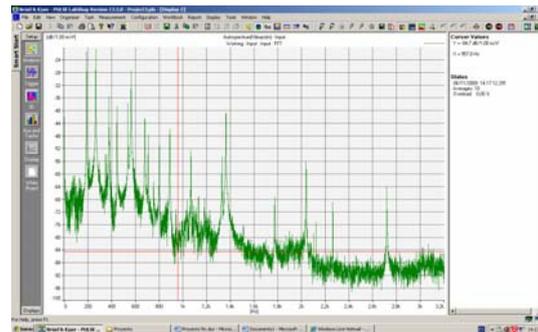


Figura 2. Respuesta en frecuencia del violín con sordina Tourte de ébano con forma de peine

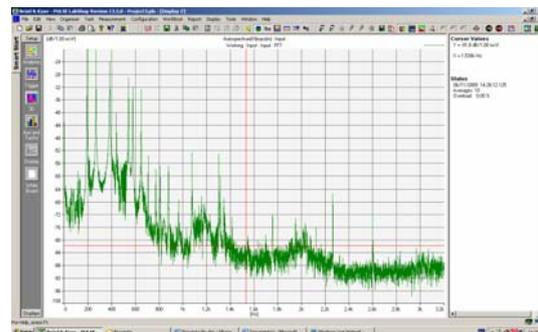


Figura 3. Respuesta en frecuencia del violín con sordina Tourte con forma de violín de goma colocada en la cuerda re

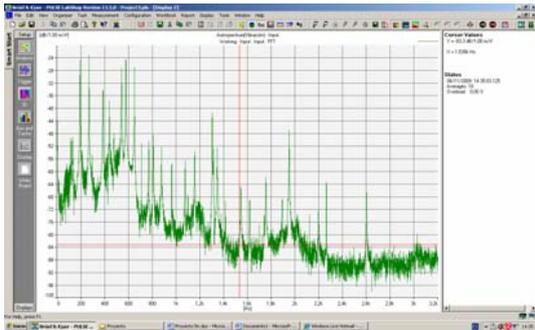


Figura 4. Respuesta en frecuencia del violín con sordina Tourte con forma de violín de goma colocada en la cuerda la

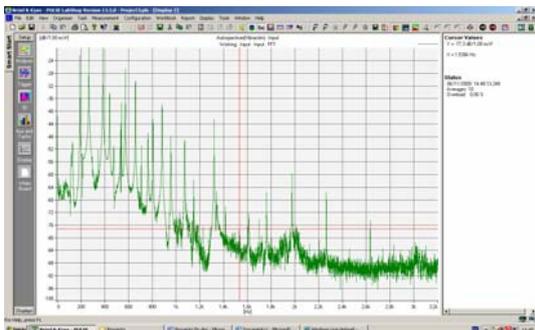


Figura 5. Respuesta en frecuencia del violín con sordina de goma con forma de peine

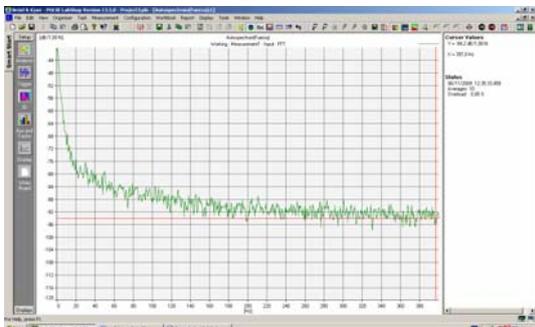


Figura 6. Respuesta en frecuencia correspondiente al impulso del martillo

De estos resultados se puede deducir que la inclusión de la sordina en el violín provoca, en todos los casos la aparición de nuevas resonancias de forma genérica en todos los casos objeto de análisis. Es más, también podemos afirmar que la aparición de resonancias también va a depender de dónde

colocamos la sordina. Un ejemplo de ello, puede contemplarse en los resultados obtenidos en el caso de la sordina Tourte con forma de violín. Cuando se coloca sobre la cuerda la (A) aparecen nuevas resonancias con respecto a cuando se coloca en la cuerda re (D)

En todos los casos se mantienen las resonancias que caracterizan la respuesta del violín, que se corresponden con las frecuencias 195 Hz, 250 Hz y 390 Hz. A partir de esta frecuencia de resonancia, la presencia de resonancias varía en función de la sordina que esté colocada

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos podemos concluir que en función del diseño y lugar donde se coloque una sordina, en el puente del violín, vamos a obtener una respuesta en frecuencia diferente, lo cual se traduce en distinta sonoridad. Por lo tanto, buscando la relación entre la presencia de resonancia y el sonido emitido por el violín se pueden proceder a diseñar sordinas con la finalidad de encontrar nuevos sonidos, que puedan utilizarse en composiciones musicales contemporáneas.

5. Agradecimientos

Me gustaría agradecer al Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad de Cádiz por su disponibilidad a la hora de facilitar la realización del ensayo. De forma especial a D. Miguel Ángel Salvá Cárdenas por su implicación y a Jorge Fernández de Brúel & Kjaer.

6. Referencias

- [1] Jim Woodhouse: "The bridge hill of the violin". Acta Acustica United with Acústica, vol. 91, 2005.
- [2] L.H. Morset: Impulse excitation of violins, M.S. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1996.
- [3] Eric Jansson: "Acoustics for violin and guitar makers", 4^a Edition, 2002. KTH University, Dept of Speech, Music and Hearing.
- [4] W.B. Atwood: "Physics and the violin". Fermi lab Colloquium, May 22, 2007.
- [5] L. Cremer, *The Physics of the Violin*, MIT Press, 1984.

Influencia de los Parámetros de la Soldadura GSFCAW Multipasada en el Valor del Ensayo de CTOD de un Acero Microaleado de Alto Límite Elástico

J.M. Portela Núñez⁽¹⁾, R.E. González Palma⁽¹⁾, J.M. González Madrigal⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/Chile nº 1 / 11002 Cádiz, 956 015 142, josemaria.portela@uca.es.

Resumen

Nuestro estudio se centrará en piezas de 60mm. de espesor soldadas por el proceso GSFCAW. Estos aceros son sometidos a un estricto control de sus parámetros de soldadura para asegurar una baja energía neta aportada en el cordón de soldadura. En nuestro trabajo se analizarán los valores obtenidos de dureza, resiliencias y tenacidad, y también se estudiará los puntos con mayor fragilidad de la ZAT. A diferencia de otros ensayos más enfocados a estudios locales del material soldado, el ensayo de CTOD se realiza en uniones soldadas a través de todo el espesor de la probeta.

1. Introducción

Los aceros micro aleados de alto límite elástico están teniendo una gran penetración en el mercado en los últimos tiempos gracias al ahorro en peso que supone su uso, sin perder las propiedades mecánicas de la estructura en las que son usados. Esta penetración se está llevando a cabo sobre todo en el sector de la automoción donde los espesores de chapa son pequeños (usándose sobre todo en partes del chasis/carrocería y suspensiones). En nuestro caso en particular vamos a centrarnos en su uso en grandes estructuras, y en particular, en estructuras sometidas a condiciones extremas de trabajo en las que se le requiere alta resistencia y tenacidad a la fractura a bajas temperaturas [1] y donde los espesores son considerablemente mayores y su uso frecuente a pesar de lo elevado de su precio.

Todas las probetas que se obtengan serán ensayadas en su condición de solo soldada (as welded).

La gran dificultad del estudio del ensayo de CTOD en las uniones soldadas reside en situar la grieta de fatiga en el lugar preciso que deseamos ensayar, en nuestro caso particular la zona afectada térmicamente (ZAT), por ser esta la zona donde la microestructura del material ha sufrido los mayores cambios debido al severo ciclo térmico al que ha sido sometida la zona.

Teniendo en cuenta que los valores de la apertura de la grieta presentan la influencia de las distintas microestructuras del fondo de la grieta y que estas micro estructuras están influenciadas por la ZAT (zona afectada térmicamente) de la soldadura, vamos a analizar

en este trabajo los valores obtenidos de dureza, resiliencia y tenacidad, así como los puntos de mayor fragilidad de la ZAT.

2. Metodología Experimental

La materia prima con la que se realiza el ensayo es un acero poco aleado (microaleado) de alta resistencia (HSLA) de acuerdo con BS7191 del tipo II estándar, y calidad 450 EMZ/QT. La composición de la colada se da en la Tabla I. Este acero ha sido suministrado completamente calmado, de grano fino, templado y revenido; con un límite elástico de 415 N/mm² y una resistencia a la tracción de 515 N/mm².

Tabla I. Composición química (% en peso)

C 0,115	Mo 0,014
Mn 1,374	Al 0,029
P 0,013	Nb 0,019
S 0,001	V 0,001
Si 0,406	Ti 0,004
Cu 0,165	N 0,004
Ni 0,518	Nb+V+Ti 0,023
Cr 0,112	Ceq. 0,410
Cu+Ni+Cr+Mo 0,809	

La probeta objeto de este estudio se obtiene del cupón soldado por semiautomática (GSFCAW) en la posición 3G UP, con la calificación de consumible AWS5.29 E81T1Ni1 usando mezcla de gas 85%Ar / 15%CO₂. La preparación de bordes es en K quedando esta ligeramente asimétrica después del resanado de la raíz para efectuar la soldadura por la otra cara.

La probeta realizada tiene 630X120X60 mm, con una preparación de bordes en K, la temperatura media alcanzada es de 396,5K teniendo un máximo de 416K y un mínimo de 348K, alcanzando una E. media de 1,3 kJ/mm teniendo su máximo en 1,7 kJ/mm y su mínimo en 1,05 kJ/mm.

Para realizar la prefactura se cortan y preparan para observación metalográfica dos secciones, una al comienzo de la soldadura y otra al final de ella, para ello se pulen con pasta de diamante de 1 μm y se atacan con nital al 2%, posteriormente repuliremos a un grado más fino y se atacará con nital al 5%. Con esto determinamos tamaño de grano en la ZAT conforme a ASTM E112, siguiendo el método de Heyn en los dos tercios del espesor de la probeta.

Existe un elevado porcentaje de tamaño de grano fino en la ZAT por el control de la energía aportada en la soldadura y al número de pasadas que le confiere un afino de grano.

Para la realización del CTOD se realizó una entalla sobre un solo borde de la probeta en la zona de grano grueso antes descrita (la probeta usada es la SENB3 conforme BS 7448-1 [2]). Todas las probetas fueron comprimidas localmente un 0,5% en la zona de unión para eliminar las tensiones residuales.

La entalla realizada es para facilitar la propagación de la grieta y consiste en una entalla realizada por medios mecánicos según recomendaciones de ASTM E399.

Se observa el porcentaje de grano fino debido a las múltiples pasadas y al control sobre la energía aportada en las macros sobre las que se realizan las entallas.

El límite elástico del material base según el certificado dado por el fabricante es de 416 N/mm², el del metal de soldadura de 654 N/mm² obtenido por un ensayo de tracción.

Conforme a BS5762 el ensayo se realizó a 263K de temperatura y teniendo especial cuidado en respetar las inercias térmicas.

Los resultados obtenidos para el CTOD son aceptables y superiores a los requeridos por BS5762 que exige un mínimo de $\delta = 0,2$ y la tenacidad a la fractura (K), estos valores se dan en la Tabla II.

Tabla II. Resultados Probetas CTOD

Probeta	K (N/mm ^{3/2})	CTOD, mm (δ)
P2A	6,042	1,36
P2B	5,671	1,33
P2C	6,046	1,52

Para el estudio metalográfico se obtuvieron rebanadas de 15 mm de las probetas ensayadas paralelas a la fractura, con objeto de obtener la superficie de la cara de la fractura.

Repetimos otra vez el proceso y se pule con pasta de diamante de 1 μm y se atacan con nital al 2%, posteriormente se repule a un grado más fino y se atacará con nital al 5%.

Se dio un corte perpendicular a la superficie de fractura, justo delante de la grieta de fatiga, de esta forma es posible determinar las microestructuras y tamaño de grano en el vértice de la grieta, a partir de esta fractura también es posible calcular el crecimiento estable de la grieta. La localización del inicio de la grieta se determina por exploración de microscopía óptica donde se puede ver, con mayor detalle el inicio de la rotura en la zona de grano grueso cercana a la línea de fusión.

La fisura se inicia en el cordón superior de la V grande de la K asimétrica, en la región con grano grueso en la probeta P2C.

Los ensayos de dureza se han llevado a cabo mediante HV Vicker 10 según lo especificado en EEMUA 158, y basándonos siempre en la situación de la línea de fusión. Los valores obtenidos y su posición en la probeta se pueden observar en la Tabla III y en la Figura 1 respectivamente.

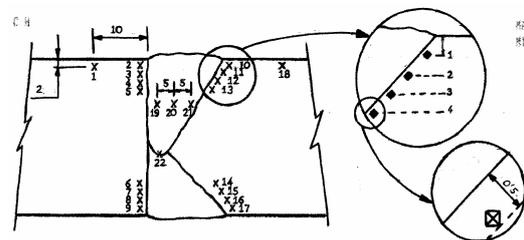


Figura 1. Mapa de toma de durezas (cotas mm).

Para los ensayos de resiliencia (@ -233K) se realizaron probetas de 55x10x10 mm con una entalla mecánica de 2 mm, se tomaron las probetas en el centro del metal aportado, en la línea de fusión y a dos y cinco mm de la línea de fusión. En la Tabla IV se observan los valores de la resiliencia en J de cada set de probetas en la línea de fusión, línea de fusión + 2 mm y línea de fusión + 5 mm.

3. Resultados y Discusión

En el CTOD de las probetas P2A y P2B un tanto por ciento bastante elevado de material refinado de la zona de la ZAT fue ensayado. Sin embargo en la probeta P2C un tanto por ciento bastante elevado de material grueso de la ZAT (ASTM<5) fue ensayado.

Las mediciones se efectuaron dentro de los 2/3 del espesor de la probeta para determinar la

cantidad de material que se ensaya dentro de la franja de 0,5 mm de la línea de fusión. En la probeta P2A la pregrieta ocupaba más del 30 % de esta zona, en la probeta P2B y P2C los resultados encontrados fueron más del 46% y 63% respectivamente pero no llegaron al valor indicado en la Sección A2.2.4 de EEMUA 158.

Aunque en el prueba previa metalografica se encontró entre el 29,6% y el 21,8% de microestructura con grano ASTM <5 está disponible en la frontera de la línea de fusión, en la practica fue imposible establecer la pregrieta sobre ella pues tenia grandes irregularidades ondulatoria en todo su recorrido a través de la pieza a ensayar.

A mayor porcentaje de metal de soldadura los valores del CTOD decrecieron, por lo que se hace patente una mayor fragilidad del metal aportado en las zonas próximas a la línea de fusión. En el tamaño de grano entre 5 y 7 ASTM , se observa una tendencia a aumentar el valor del CTOD conforme el tamaño de grano disminuye. Para un tamaño de grano fino (> 7 ASTM) la tendencia también es creciente y se confirma el aumento de la tenacidad para este tamaño de grano. Las fracturas fueron dúctiles.

Para la resiliencia se puede observar que disminuye en la línea de fusión y a medida que nos alejamos, por ejemplo 5mm, la resiliencia aumenta, llegando a bajar bastante en la zona de la raíz por la fragilidad que le proporciona el grano grueso.

Para los puntos que se encuentran a 2 mm de LF, la resiliencia es mayor en los cordones superiores que en la raíz, en parte debido al

tratamiento térmico que supone el efecto multipasada para los cordones superiores y en parte a la disminución de la tenacidad en la raíz, disminuyendo esta diferencia conforme progresamos desde la línea de fusión hacia el metal base.

Como era de esperar en la línea de fusión la resiliencia alcanza los mínimos valores puesto que el grano grueso es más frágil y corresponde a una estructura entre cuyos productos de transformación se encuentra la martensita.

La mayor dureza encontrada está localizada en la raíz, con 282,9 HV10 puntual (cercano al límite de 300 HV10 aconsejado para estos aceros), y se corresponde con la menor resiliencia y fractura encontrados en la probeta como era de esperar desde un principio, pues en esta zona se encuentra el mayor tamaño de grano y la mayor fragilidad, lo que incide en una mayor dureza.

4. Conclusiones

El valor de CTOD están muy afectados por la localización de la grieta de fatiga en la ZAT y dependiendo de la microestructura que tenga que atravesar [4].

Como suele ser común en muchos de los casos estudiados hasta ahora no se cumple con el requisito de la Sección A2.2.4 de EEMUA 158, en lo referente a que la totalidad de la longitud de la grieta debe estar dentro de los 0,5 mm de la línea de fusión (región grano grueso), en el caso de nuestro estudio no la cumplió de forma estricta ninguno.

Tabla III. Valores de dureza (D) HV10, energía aportada (E) en kJ/mm y temperatura entre pasadas (T) en °C en cada punto (V) situado en la Figura 1

	BMLT	FLTL				FLRL				WM TOP		
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V19	V20	V21
D	183,34	274,26	272,16	245,16	223,52	223,52	226,66	289,65	270,09	223,52	234,80	239,89
E	N/A	1,04	1,56	1,56	2,12	1,41	1,16	1,16	1,19	1,56	1,48	1,44
T	N/A	75	80	80	80	97	95	95	80	80	87	90
	FLRR				BMTR	FLTR				WN ROOT		
	V14	V15	V16	V17	V18	V10	V11	V12	V13	V22		
D	207,38	250,59	282,90	272,16	175,53	268,04	268,04	228,25	233,14	213,04		
E	1,51	1,51	1,51	0,98	N/A	1,11	1,44	1,44	1,26	2,12		
T	90	90	90	75	N/A	84	90	90	80	80		

Tabla IV. Valores medios de resiliencia (R) en J, energía aportada (E) en kJ/mm y temperatura entre pasadas (T) en °C en cada set de probetas

	WMT (M APORTE TOP)	FLT (LÍNEA DE FUSIÓN SUPERIOR)			WMR (M APORTE RAIZ)	FLR (LÍNEA DE FUSIÓN RAIZ)		
	WMT	FLT	FLT +2	FLT +5	WMR	FLR	FLR +2	FLR +5
R	77,50	142,57	131,13	200,45	104,97	158,27	123,93	125,24
E	1,56	2,12	2,12	N/A	1,19	1,14	1,14	N/A
T	80	80	80	N/A	90	97	97	N/A

Conforme el porcentaje de la región intercrítica atravesado por la grieta aumenta, se observa una caída en el crecimiento estable. Este resultado aparentemente no es muy lógico, pues la región atravesada tiene un tamaño de grano relativamente pequeño que no tiene que justificar una disminución de la tenacidad. Algunos autores [5,6] justifican este hecho por la fragilización que las lagunas martensíticas producen en la región intercrítica cuando en el enfriamiento la austenita queda atrapada.

En la toma de durezas no han existido sorpresas obteniendo los valores propios de un acero templado y revenido, teniendo una dureza elevada en el material de aporte y zonas próximas a la línea de fusión, para ir disminuyendo como consecuencia del recocido que sufre el material por el efecto multipasada que se produce en las chapas de grandes espesores por lo que la dureza aún siendo superior a la zona de recocido es inferior a la del material de aporte. Los puntos de mayor dureza se corresponden con la menor resiliencia y viceversa.

No obtenemos una caída significativa de la resiliencia en la región intercrítica. Las durezas disminuyen conforme nos alejamos de las zonas que ha sido sometida a una mayor temperatura. La raíz muestra un pequeño incremento de dureza en los cordones superiores debido al ciclo térmico que ha estado sometida, lo que le confiere una mayor fragilidad, teniendo por lo tanto una mayor resiliencia.

5. Referencias

- [1] J.C. Suárez, R.González, Jiménez, F. Molleda, Comportamiento a la Fractura de los Constituyentes Microestructurales de Baja Tenacidad en la ZAC Intercrítica de Uniones Soldadas de un Acero HSLA para Plataformas Off-Shore. Anales de Mecánica de Fractura. XI Encuentro del Grupo Español de Fractura en San (1994). 250-257.
- [2] BS 7448-1 Fracture mechanics toughness test part 1. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials, British Standards Institution, 2000.
- [3] R. González-Palma, J.C. Suárez Bermejo, F. J. Vicario, Aurelio Muñoz, Procesos Metalúrgicos de Aceros Microaleados de Alta Resistencia 450 EMZ Tipo II en la Zona Afectada Térmicamente debido al Efecto Multipasada en Soldaduras por Arco Sumergido. Revista de Metalurgia Madrid vol. 42, (2006) 256-269.
- [4] J. M. Portela, R. González-Palma, J. M. González, F. J. Vicario, A. Muñoz. Análisis Paramétrico y Predicción de Apertura de Grieta en Ensayo de CTOD de Aceros Tipo HSLA 450 EMZ/QT. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, vol. 1, (2008) 287-294.
- [5] D.P. Fairchild, N.V. Bangaru, J.Y. Koo, P.L. Harrison and A. Ozekcin, A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels, Welding Journal, (1991) 321-329.
- [6] Rafael Ernesto González-Palma, Estudio de la tenacidad a la fractura en ZAC de la soldadura de los aceros microaleados para plataformas Off-Shore. Publicación de la tesis doctoral en libro electrónico, servicio de publicaciones de la universidad de Cádiz. ISBN: 84. 7786-32 E-3. 1996.

Influencia del material de la herramienta en el rendimiento del mecanizado de las aleaciones de Titanio

M.A. Castillo Jiménez⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Univ. de Sevilla. Virgen de África, 7. 41011 Sevilla. Telf. 954554357. macastillo@us.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Univ. de Cádiz. Chile, 1. 11002 Cádiz.

Resumen

Las aleaciones de titanio son utilizadas de forma profusa en la construcción de componentes aeroespaciales. En una gran parte, estos componentes pasan por un proceso de mecanizado donde el principal problema que se plantea es el rápido desgaste de las herramientas de corte. En este trabajo se analizan las causas y consecuencias de este desgaste, los materiales de herramientas y su influencia en el costo del mecanizado, estableciendo las bases de estudio para la determinación de la mejor relación material de herramienta y condiciones de corte para la mejora del rendimiento del proceso.

1. Introducción

En la construcción de aeronaves se utilizan distintos materiales y aleaciones. Entre ellos están los aceros, las aleaciones de níquel, de titanio y de aluminio.

Las aleaciones de titanio tienen una alta relación resistencia-peso, lo que las hace muy apropiadas para su utilización en la elaboración de motores y componentes estructurales de las aeronaves, debido a su propiedad de mantener su alta resistencia incluso a altas temperaturas [1]. Para el empleo de dichos materiales como parte de motores y de elementos estructurales de las aeronaves, han de pasar por un ciclo de fabricación en el que, en alguna de sus fases, deben ser sometidos a diferentes procesos de mecanizado.

En el caso particular de las aleaciones de titanio, uno de los principales condicionantes se encuentra en la baja conductividad térmica de estas aleaciones, y en la reactividad del titanio con algunos de los materiales utilizados en las herramientas [2], lo que produce un elevado desgaste de estas últimas e imposibilita la utilización de elevadas velocidades de corte, lo cual implica la disminución del rendimiento económico del proceso.

2. Desgaste de las herramientas de corte.

Durante el proceso de mecanizado la herramienta está sometida a la acción combinada de grandes tensiones mecánicas debidas a las fuerzas generadas durante el corte, a elevadas temperaturas como consecuencia de la energía disipada en forma de calor y a efectos corrosivos debidos, en parte, a los refrigerantes utilizados [3]. Estas son las causas primarias

que dan origen a la aparición de distintos mecanismos de desgaste progresivo de la herramienta e incluso, en casos extremos, al fallo por destrucción total del filo cortante [4].

En la Figura 1 pueden observarse de forma esquemática los principales mecanismos de desgaste y su incidencia en función de la temperatura de corte. Puede observarse que para una determinada temperatura el desgaste puede depender de uno o varios mecanismos, pero, por lo general, existe siempre uno que actúa como determinante [3].

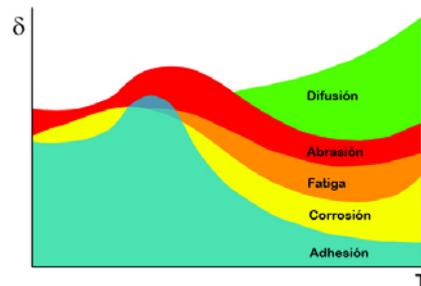


Figura 1. Representación esquemática de los mecanismos de desgaste en función de la temperatura.

En el caso del mecanizado de las aleaciones de titanio, la formación de una capa de material adherida a la herramienta y las altas temperaturas que se producen en el mecanizado favorecen las condiciones para que se produzca la difusión de elementos de la aleación en la herramienta y viceversa.

El desgaste progresivo de la herramienta tiene lugar en dos zonas perfectamente diferenciadas, tal como se muestra en la Figura 2, donde

tiempo de duración de la herramienta en función de la velocidad de corte para dos tipos de herramienta con distinto tamaño de grano de WC [13,14].

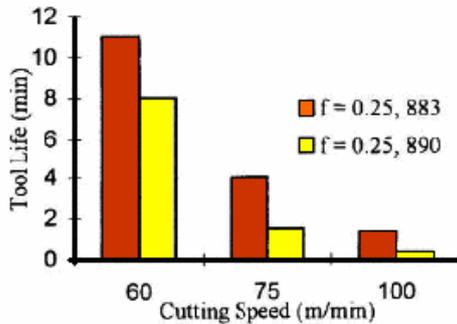


Figura 5. Tiempo de duración de la herramienta en función de la velocidad de corte para herramientas de WC de distinto tamaño de grano.

A velocidades comprendidas entre los 50 a 100 m/min. se suelen utilizar carburos recubiertos [15]. El recubrimiento proporciona una barrera térmica para la herramienta, disminuye el coeficiente de fricción y reduce las fuerzas de corte cuando se mecanizan estas aleaciones [16]. Los compuestos del recubrimiento contienen la difusión de las partículas de la herramienta a la viruta a altas velocidades de corte por la formación de una capa protectora saturada de partículas de la herramienta. El recubrimiento de nitruro de aluminio-titanio TiAlN es el que mejor comportamiento ofrece en el mecanizado de las aleaciones de titanio, sobre todo en procesos de corte interrumpido [17]. En la Figura 6 se muestra el estudio comparativo realizado en operaciones de taladrado en seco con herramientas de carburo recubiertas de TiAlN y no recubiertas con diferentes velocidades de corte, encontrándose en todos los casos mejores rendimientos en las recubiertas [18].

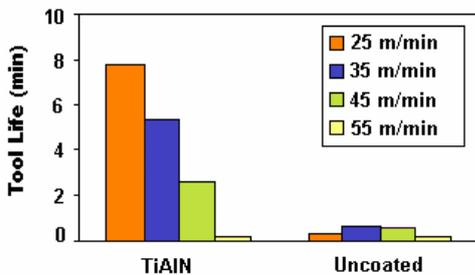


Figura 6. Comparación de los tiempos de duración de brocas de metal duro recubiertas y no recubiertas.

Algunas marcas comerciales han desarrollado metales duros más resistentes a las elevadas temperaturas y nuevos recubrimientos a base de TiB₂ que parecen ofrecer mejor protección térmica y menor resistencia al deslizamiento, por lo que disminuye el desgaste por abrasión, como las nuevas herramientas CTC5240 de Ceratizit, Figura 7. Según los datos del fabricante, la nueva calidad de metal duro CTC5240 permite velocidades de corte de hasta un 20 % más elevadas, con el consiguiente ahorro de costes.



Figura 7. Nuevas plaquitas CTC5240 con recubrimiento de TiB₂ de Ceratizit.

Las aleaciones de titanio se mecanizan con herramientas de CBN y PCD en condiciones de acabado a velocidades de corte superiores a 350 m/min, velocidades de avance de 0,05 m/min y profundidades de corte de 0,5 mm [19].

En comparación con herramientas de CBN y de carburo recubierto y en condiciones de corte de 75 m/min de velocidad de corte, avance de 0,25 mm y profundidad de corte de 1 mm y en el mecanizado por torneado en seco de la aleación de titanio TA48 (Ti-5Al-4Mo-2Sn), las herramientas de PCD muestran mejores resultados en términos comparativos que las herramientas de CBN y las de carburo con recubrimiento multicapas TiC/TiC-N/TiN. En la Figura 8 se muestran los resultados en términos de duración de la herramienta de PCD en comparación con las de CBN y carburo.

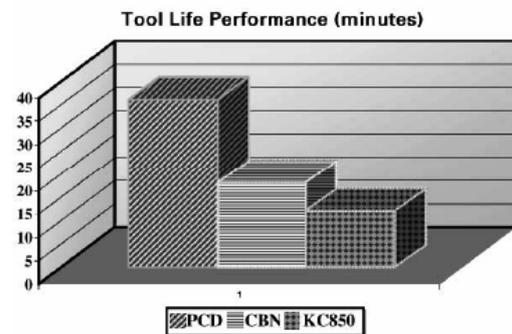


Figura 8. Rendimiento de las herramientas en el mecanizado en seco de aleación TA48.

No obstante, su elevado costo y el hecho de que no puedan utilizarse en todas las condiciones de corte, limitan en gran forma su utilización.

La mejora de la maquinabilidad y del rendimiento del proceso a altas velocidades de corte es posible de obtener utilizando líquido refrigerante administrado muy cerca del punto crítico en la zona de deformación secundaria [20]. Esto se puede conseguir mediante la introducción del refrigerante a alta presión y adecuadamente dirigido a la zona de formación de la viruta, Figura 9.

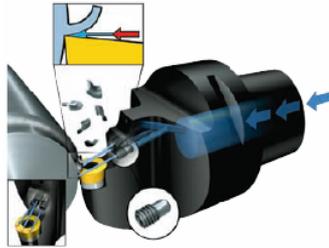


Figura 9. Chorro de refrigerante a alta presión lanzado sobre la zona de deformación secundaria.

Los beneficios de la utilización de la refrigeración a alta presión son evidentes cuando se mecanizan las aleaciones de titanio tanto con carburos recubiertos y no recubiertos, como cuando se mecaniza con herramientas PCD, tal como se muestra en la Figura 10 [19, 20].

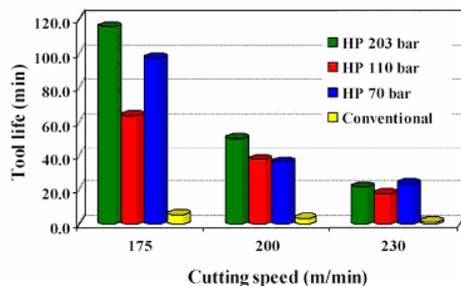


Figura 10. Duración de la herramienta cuando se mecanizan aleaciones de titanio con herramientas PCD con refrigeración convencional y a alta presión.

3. Metodología Experimental

Aunque el estudio aún está en fase de desarrollo, se pretende analizar el grado de desgaste de distintos tipos de herramientas y en diversas condiciones de corte en función del cumplimiento de las características microgeométricas exigidas en las piezas. Para ello se determinará el grado de rugosidad superficial obtenido en las piezas y la observación del desgaste de la herramienta tras

la realización de un proceso de mecanizado en distintas aleaciones de titanio mediante microscopía óptica S.O.M. y microscopía electrónica S.E.M. y análisis E.D.S. de la superficie de la herramienta. Asimismo se estudiarán los mecanismos de desgaste mediante ensayos Pin-on-disk. De esa forma se pretende obtener y modelar la mejor relación material de herramienta-condiciones de corte en el mecanizado de las aleaciones de titanio.

4. Conclusiones

La durabilidad de la herramienta es uno de los factores que incide de forma predominante en el costo del mecanizado de las aleaciones de titanio y, por tanto, en el rendimiento económico del proceso.

En la bibliografía e investigaciones existentes, se hace hincapié fundamentalmente, en el estudio de algunos de los procesos de desgaste en el mecanizado de las aleaciones de titanio y análisis de durabilidad de ciertos tipos de herramientas en función de ciertos parámetros, como la velocidad de corte, en determinadas condiciones. En cambio se adolece de un estudio general en conjunto que abarque la acción combinada de las posibles causas de desgaste de las herramientas y proporcionen recomendaciones de parámetros y condiciones de corte en función de las características microgeométricas exigidas en las piezas.

Este trabajo pretende sentar las bases de estudio con el fin de poder llegar a determinar la mejor relación entre material de herramienta-condiciones de corte y lubricación, estableciendo de ese modo las condiciones de mejora del rendimiento del proceso.

5. Referencias

- [1] R.R. Boyer. *An overview on the use of titanium in aerospace industry*. Jour. of Mat. And Sci. Engin. Part A 213. 1996. 103-114.
- [2] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang. *Titanium alloys and their machinability. An overview*. Jor. of Mat. Processing Technology, 68 (1997). 262-274
- [3] Sánchez Carrilero, M, Márcos Bárcena, M. *Relaciones paramétricas en el mecanizado*. 1994. Serv. Pub. Universidad de Cádiz.
- [4] Dearnley, P.A., Grearson, A.N. *Evaluation of principal wear mechanism of cemented carbides and ceramics used for machining titanium alloys*. Materials Science and Technology 2. 1986. 47-58.
- [5] Trent, E.M., Wright, P.K., *Metal Cutting*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2000.

- [6] Viktor P. Astakhov. *The assessment of cutting tool wear*. Int. Jour. of Machine Tool and Manufacture 44. 2004. 637-647.
- [7] D. Jianxin, Li Yousheng, Song Wenlong. *Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools*, Wear 265 (2008) 1776-1783.
- [8] ASM Handbook Committee. *Metal Handbook*. 9^a ed., vol. 18. American Society for Metals. Ohio, 1979-1989.
- [9] Ginting, A., Nouari, M. *Experimental studies on the performance of alloyed carbide tools in dry milling of aerospace materials*. Mach. Tools an Manufacture 46 (2006). 758-768.
- [10] Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamana, Y. *An overview of the machinability of aeroengine alloys*. Jour. of Mat. Processing Technology 134 (2003) 233-253..
- [11] E.O. Ezugwu, *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1353-1367.
- [12] Narutaki, N., Murakoshi, A. *Study on Machining of Titanium alloys*. Annals of the CIRP Vol. 32. 1983.
- [13] A.Jawaid, C.H. Che-haron, A. Abdullah, *Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246*, J. Mater. Process. Technol. 92-93 (1999) 329-334.
- [14] Komanduri, R., Reed, W.R. *Evaluation of carbide grades and new cutting geometry for machining titanium alloys*. Wear 92 (1983) 113-123.
- [15] Nouari, M., Ginting, M. *Wear characteristics and performance of multilayer CVD coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy*. Surface and Coating Technology 200 (2006) 5663-5676.
- [16] L.N. Lopez de lacalle, J. Perez, J.I. Llorente, J.A. Sanchez, *Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys*, Journal of Materials Processing Technology 100 (2000) 1-11.
- [17] Moreno Téllez, C.M. *Nuevos recubrimientos para el fresado a alta velocidad de Ti6Al4V con herramientas de metal duro*. Tesis doctoral. Universidad de Navarra. 2007.
- [18] Sharif, S., Rahim, E.A. *Performance of coated and uncoated carbide tools when drilling titanium alloy Ti6Al4V*. Materials Processing Technology 185 (2007) 72-76.
- [19] Z.A. Zoya, R. Krishnamurthy, *The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys*, J. Mater. Process. Technol. 100 (1-3) (2000) 80-86.
- [20] E.O. Ezugwu, R.B. Da Silva, J. Bonney, A. .R. Machado. *Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1009-1014.

Influencia del Mecanizado en la Integridad Superficial de Aleaciones de Ti. Estudio preliminar basado en desviaciones de forma

M. Huerta Gómez de Merodio⁽¹⁾, M. Márcos Bárcena, E.M. Rubio Alvir⁽²⁾

⁽¹⁾ Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, C/ Chile, nº 1, 956015142, milagros.huerta@uca.es

⁽²⁾ Ingeniería de Construcción y Fabricación, C/Juan del Rosal 12

Resumen

Debido al gran aumento del uso de la aleación de Titanio Ti6Al4V en los aviones (por su excelente relación peso/propiedades mecánicas), y al elevado coste de este material, se ha visto la necesidad de buscar un proceso de producción que optimice el rendimiento de dichas piezas. Como primer paso, se ha visto la necesidad de estudiar la Integridad Superficial de dichas piezas, variando los parámetros de mecanizado, y así buscar aquellos parámetros que den el mejor acabado posible, optimizando el proceso de producción. Este trabajo se centra en estudiar las desviaciones de forma de las piezas.

1. Introducción

En trabajos anteriores, se ha ido estudiando la evolución del uso de aleaciones de Titanio en el sector aeroespacial. También se ha visto y analizado el motivo por el que el incremento del uso del Titanio en este sector se está disparando en los últimos años [1], a pesar de su alto coste.

Es por esto por lo que se ve la necesidad de optimizar los procesos de producción de las piezas fabricadas en dicho material, pues si se consigue alargar la vida de las piezas, dejará de ser un *inconveniente* el coste de dicho material.

Además, también se trata de buscar un Proceso de Producción más económico, eliminando etapas en el proceso, o haciendo que dichas etapas sean menos costosas [2].

Para todo ello, uno de los pasos que se está llevando a cabo es estudiar cómo influyen los distintos Parámetros de Mecanizado en la Integridad Superficial de las Aleaciones de

Titanio.

Como primer paso, se ha estudiado la influencia del avance de mecanizado en la rugosidad. Este estudio se podrá ver en un artículo aprobado para publicación en la Revista *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems (IJMMS)*. El título de dicho artículo es “Surface Finish based Analysis of Turned Titanium Alloys Workpieces”. En dicho trabajo, se analiza la variación de la rugosidad de la pieza, para diferentes datos de avance. En dicho trabajo, se observa que existe linealidad entre el avance en el mecanizado y la rugosidad que se genera en la pieza, Figura 1, que está en concordancia con los resultados obtenidos para otras aleaciones [3].

El siguiente paso realizado, es analizar las desviaciones de forma a las que se encuentra sometida la pieza, tras el mecanizado. En el siguiente apartado, se explica la metodología

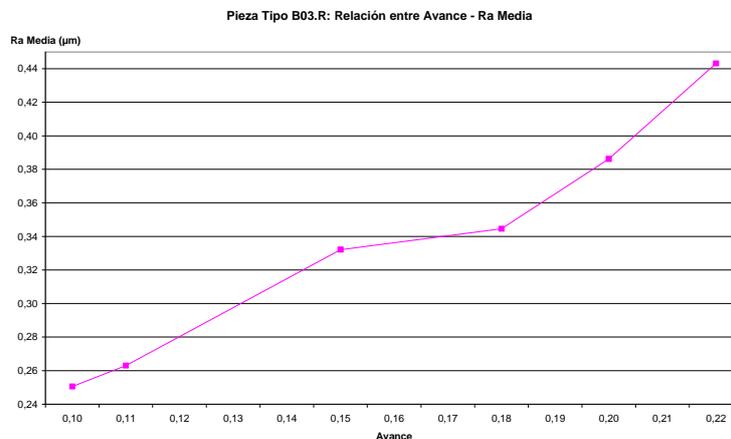


Figura 1. Influencia del avance en la media de Ra para distintas piezas torneadas en planta con lubricación.

seguida para llevar a cabo este estudio de formas.

2. Metodología Experimental

Se ha utilizado la máquina MMQ 44, Figura 2, para obtener las distintas medidas de formas necesarias para el presente estudio: paralelismo, rectitud, redondez, cilindridad, concentricidad y oscilación radial.



Figura 2. Pieza Tipo B03.R, colocada en la máquina MMQ 44 (Mahr).

Para obtener los datos, se ha procedido a programar la máquina, indicándole las medidas que se quieren obtener, en función de la posición de la pieza y de las medidas de rugosidad obtenidas en trabajos anteriores, para poder luego comparar los datos obtenidos en ambos estudios.

Para cada tipo de pieza, ha tenido que realizarse una programación distinta, siendo ésta la parte más laboriosa, pues una vez realizada la programación, simplemente hay que colocar la pieza en la máquina, tal y como puede verse en

la Figura 2, alinearla (esta máquina no lo hace automáticamente, necesita que se corrijan parámetros manualmente) y, una vez alineada dentro de unos rangos admisibles, se pone la máquina a medir la pieza y a sacar los informes solicitados en la programación [4]. Es por esto, por lo que la parte más importante de estas medidas es la programación de lo que se desea medir y de los informes que se quieren obtener.

Una vez obtenidos dichos informes, Figuras 3 y 4, se ha procedido a representar en unas gráficas los valores medios obtenidos en dichos informes.

Lo primero que se observa con estas gráficas, es la similitud que se da entre las medidas macrogeométricas y las microgeométricas. Ya que la evolución de la rugosidad, estudiada en trabajos anteriores, con relación a la posición longitudinal de la pieza, es similar a la evolución de la Rectitud, que se observa en la Figura 5.

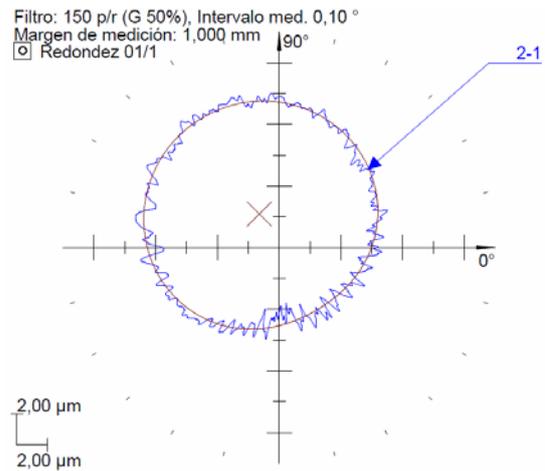


Figura 3. Ejemplo de Informe generado por la máquina MMQ 44. Medida de Redondez.

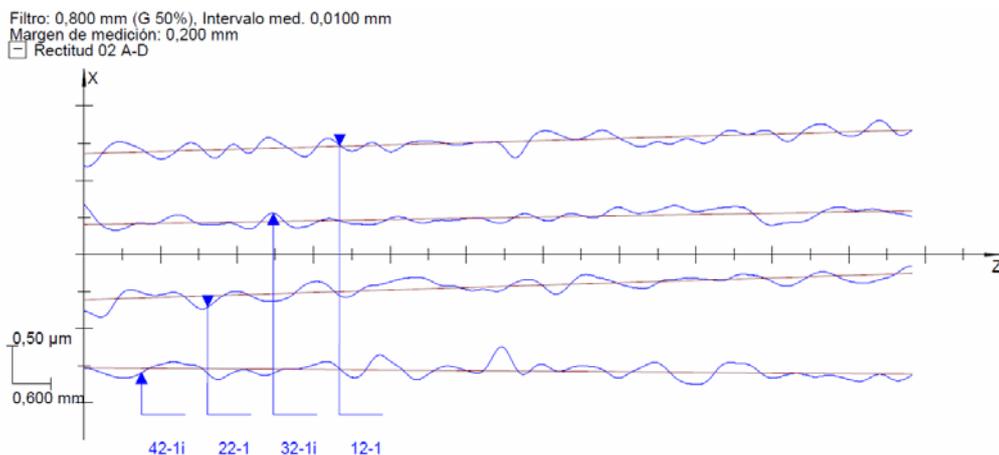


Figura 4. Ejemplo de Informe generado por la máquina MMQ 44. Medida de Rectitud.

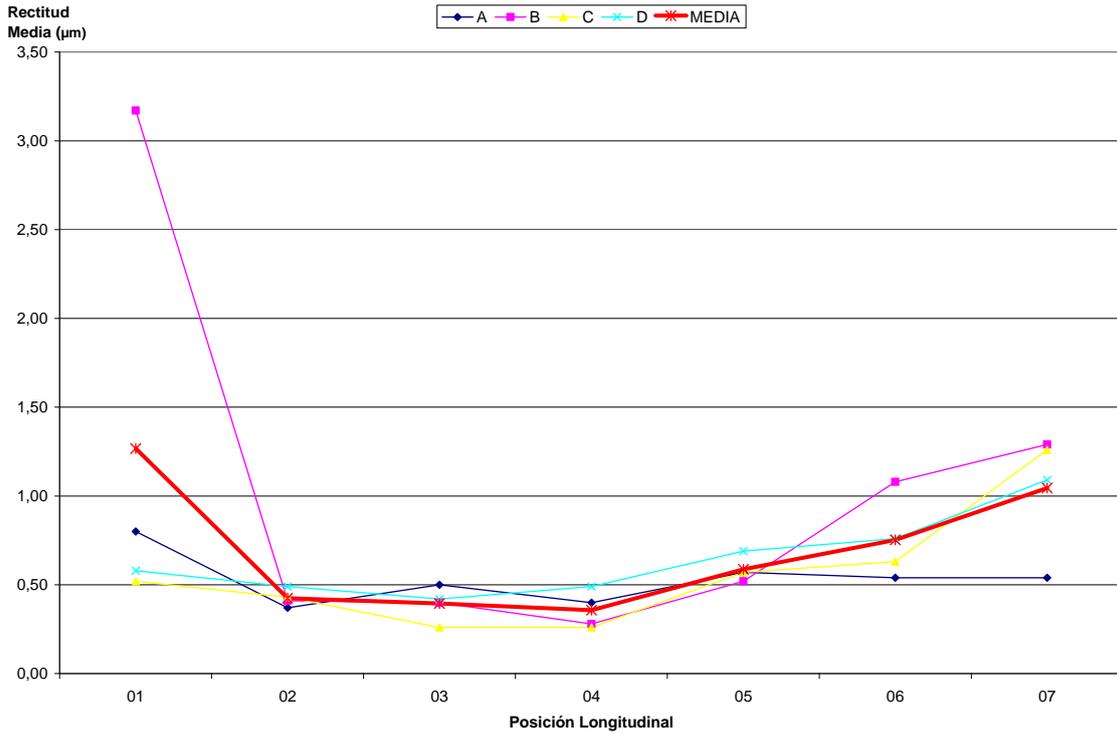


Figura 5. Rectitud Media - Posición Longitudinal de la pieza B03.01.R

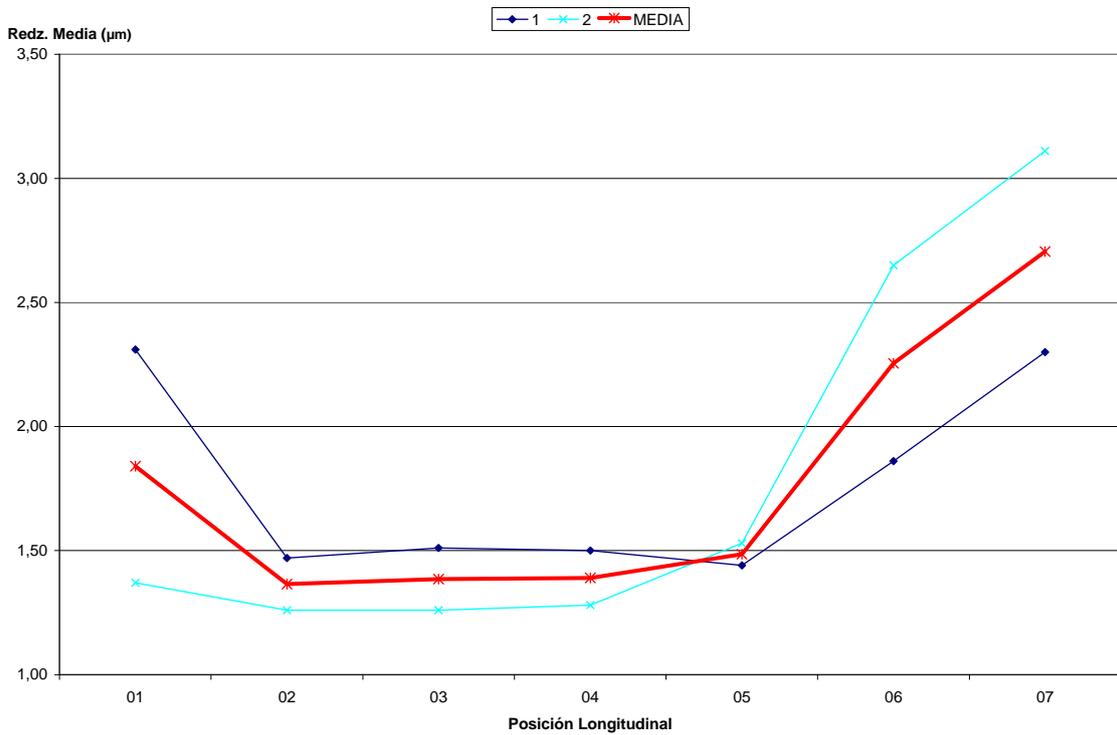


Figura 6. Redondez Media - Posición Longitudinal de la pieza B03.01.R

En la Figura 6, se muestra la evolución de la Redondez, en los distintos tramos en los que se ha dividido la pieza, teniendo como datos 1 y 2, los valores de la medida en la parte inferior (1) del tramo y la parte superior (2) del mismo

tramo, mostrando también el valor medio de dichas medidas. En la Figura 7, se muestra una fotografía de una Pieza Tipo B03, indicando la posición de cada uno de los tramos.

Como ya se ha dicho anteriormente, el estudio de las medidas de forma de las piezas, se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las mismas posiciones longitudinales que se estudiaron en la rugosidad, para poder tener datos que nos compararan unas medidas con otras, y así poder establecer relaciones entre ambas, en función de los parámetros de mecanizado que fueran variando.



Figura 7. Pieza Tipo B03.R, indicando los distintos tramos de medición.

Actualmente, se está estudiando la relación existente entre las distintas medidas de forma tomadas en este estudio y el avance con el que se mecanizaron las piezas, para buscar una ecuación que nos indique el comportamiento del material para estas situaciones.

3. Resultados y Discusión

Aunque aún no se ha establecido la relación entre cada una de las medidas de forma de la pieza con el avance, se puede adelantar que no será muy difícil establecer una ecuación que relacione la medida con el avance, ya que se está viendo que la evolución va siendo similar a la que se presentó cuando se estudió la rugosidad de la pieza.

Hasta ahora, se ha estado estudiando la parte de la pieza que va de los tramos 01 al 07, pero este mismo estudio hay que hacerlo los demás tramos, del 08 al 10. Este estudio servirá para ampliar información sobre las relaciones que se están estableciendo, ya que el mecanizado de esa parte de la pieza se ha realizado con parámetros diferentes.

4. Conclusiones

Se ve necesario seguir estableciendo relaciones entre las desviaciones de forma y los parámetros

de mecanizado (en un futuro se estudiarán relaciones variando otros parámetros de mecanizado).

Todas estas relaciones que se están estableciendo, se estudiarán y analizarán también con las Tensiones Residuales generadas en la pieza, pues si es importante que una pieza tenga un buen acabado superficial, también se estima necesario conocer el estado tensional de la pieza, para poder hacerla más duradera [5].

5. Agradecimientos

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación llevado a cabo entre la Universidad de Cádiz y Airbus Military, S.L. El desarrollo del trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Innovación y Ciencia (Proyecto DPI2008-06771-C04-01) y por la Junta de Andalucía.

6. Referencias

- [1] Lütjering G., Williams. J.C., Titanium, 2nd ed. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [2] Ribeiro, M.V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., 2003, Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining, J. Mater. Proc. Tech., 143-144, 458-463.
- [3] Rubio, E.M., Camacho, A.M., Sánchez-Sola, J.M., Marcos, M., Surface roughness of AA7050 alloy turned bars. Analysis of the influence of the length of machining, J. Mater. Proc. Tech., 162-163 (2005) 682-689.
- [4] Sánchez, J.M, Análisis paramétrico del mecanizado de aleaciones de aluminio. Relación con la topografía superficial de piezas mecanizadas, Tesis Doctoral, UNED (2004)
- [5] M. Huerta, J. Gerez, M.S. Carrilero, J. Salguero, M. Batista, M. Marcos, Análisis y Evaluación de las Tensiones Residuales en el Mecanizado de Aleaciones de Titanio, Congreso Nacional de Materiales, San Sebastián 2008.

Introducción al estudio de la influencia del proceso de mecanizado en la corrosión de aleaciones de aluminio

R. Bienvenido Bárcena⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/Chile s/n 11003, 956015105, rafael.bienvenido@uca.es

Resumen

En un sector industrial como el aeronáutico, El control de los procesos de fabricación permite disponer de un máximo acercamiento a las condiciones de diseño de las piezas fabricadas. El proceso de fabricación forma parte de la historia de la pieza y su comportamiento funcional depende de dicho proceso. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en un estudio preliminar orientado a establecer la influencia de las condiciones de mecanizado en el comportamiento frente a la corrosión en agua de mar de aleaciones de aluminio de uso aeronáutico. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la notable influencia del avance y una influencia más suave de la velocidad de corte.

1. Introducción

El desarrollo de tecnologías y materiales que abran nuevas vías en el transporte aéreo ha sido una preocupación continua en la industrial aeroespacial. En la actualidad, la mayoría de las compañías constructoras aeronáuticas contemplan el uso de aleaciones de aluminio debido a su excelente relación peso/propiedades físico-químicas/coste. Los niveles tecnológicos desarrollados en el sector aeronáutico son uno de los más elevados dentro de la industria actual, ya que los elementos que componen una aeronave están sometidos a esfuerzos límites y grandes cambios de presiones y temperaturas en cortos intervalos de tiempo, por lo que la respuesta funcional de estos elementos debe responder a elevados requerimientos de calidad. En ese contexto, las variables que definen la integridad superficial de las piezas desarrolladas disponen de estrechos intervalos de tolerancias de fabricación.

De acuerdo con lo anterior, la seguridad es uno de los principales condicionantes en la selección del material que debe ubicarse en elementos estructurales. En este sentido, una de las principales vías de investigación en este campo contempla el desarrollo y control en servicio de materiales mucho más resistentes a las distintas acciones agresivas a las que pueda verse sometido. Una de las causas frecuentes del deterioro de los elementos metálicos aeronáuticos es la corrosión, algunos de cuyos efectos pueden ser potenciados en origen por el propio conjunto de procesos de conformado a los que se someten antes de su puesta en servicio [1]. Esto resulta especialmente crítico

en aquellos procesos que pueden afectar a las propiedades fisicoquímicas de superficie. En este contexto se ubican los procesos de mecanizado, en los cuales las condiciones de trabajo pueden tener una influencia crítica sobre la integridad superficial de las piezas [1,2].

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en un estudio preliminar orientado a establecer la influencia de las condiciones de mecanizado en el comportamiento frente a la corrosión en ambientes salinos de aleaciones de aluminio de uso estratégico en el marco del sector industrial aeronáutico.

2. Metodología Experimental

Para la realización de este trabajo se han dispuesto barras cilíndricas de la aleación UNS A92024-T3, cuya composición nominal se incluye en la Tabla I.

Tabla I. Composición de la aleación AA2024

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ot	Al
4.0	1.5	0.6	0.5	0.5	0.25	0.25	Rest

Los extremos de dichas barras se han refrentado empleando velocidades de corte entre 0 y 200 m/min y avances entre 0.04 y 0.28 mm/rev (Tabla II) a una profundidad de corte constante de 0,5 mm, Figura 1.

Una primera referencia de la integridad superficial se ha obtenido a partir del análisis superficial de las piezas mecanizadas. Dicho análisis se ha basado en el estudio de las desviaciones microgeométricas a partir de la evaluación de la rugosidad en un rugosímetro

Mahr Perthmeter Center con unidad de avance PGK 120, Figura 2. Paralelamente se ha llevado a cabo una caracterización microestructural y microcomposicional combinando de técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS). Los estudios de SEM se han realizado con un microscopio QUANTA 200 equipado con un analizador EDAX modelo Phoenix.



Figura 1. Instante de un Ensayo de Refrentado.

Todo el análisis superficial, se han desarrollado en zonas diferenciadas según la velocidad de corte, marcadas por la distancia al centro, estableciéndose así con velocidad baja las zonas más cercanas al centro de la muestra, y de velocidad alta las más alejadas del centro.

Tabla II. Valores medios de Ra (μm) según avance y velocidad

avances mm/rev	velocidad baja (A)	velocidad media (B)	velocidad alta (C)
0,283	2,1	2,1	
0,2	0,95	1	1
0,1	0,6	0,5	0,55
0,04	0,25	0,2	0,2

Finalmente se ha llevado a cabo un estudio preliminar de una de las propiedades fisicoquímicas de superficie, como es la resistencia a la corrosión.

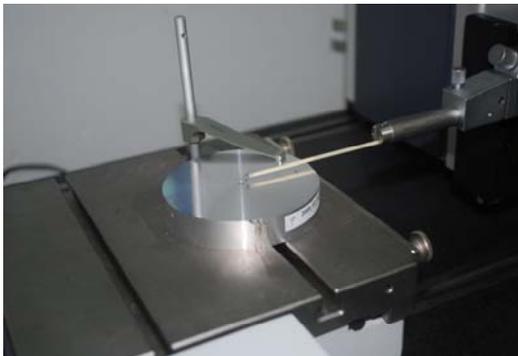


Figura 2. Equipo para la evaluación de desviaciones microgeométricas (Ra)

Para disponer de una primera evaluación se han realizado ensayos acelerados de corriente continua en una celda plana Parc EG&G K235 acoplada a un potenciostato Solartron modelo 1287, empleando como electrolito una disolución de ClNa al 35%.

3. Resultados y discusión.

Los análisis mediante SEM y EDS de la aleación han puesto de manifiesto que en la superficie de la misma se pueden observar la presencia de partículas intermetálicas (Figura 3), algunas de los cuales son los responsables del principal daño por corrosión de la aleación, en buen acuerdo con los resultados observados en otras aleaciones de la misma serie como la UNS A92017-T3 [4].

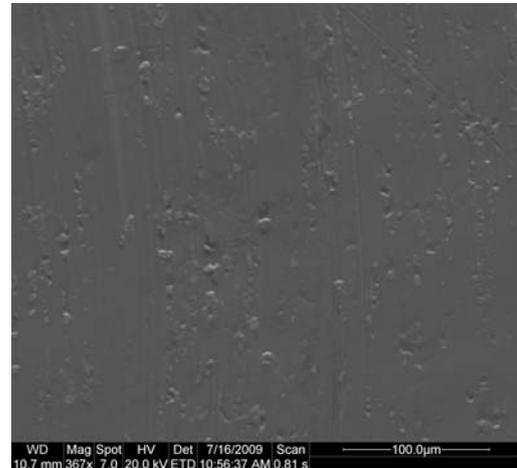


Figura 3. Imagen SEM en la que se aprecian intermetálicos.

De acuerdo con [1,4] la densidad de intermetálicos es crítica en la respuesta electroquímica de la aleación y viene influida por el proceso de acabado superficial al que se ha sometido la muestra.

Para poder realizar una valoración de la densidad de intermetálicos, se han analizado respuestas de electrones retrodispersos en los equipos de SEM-EDS. Mediante esta técnica, se han podido obtener imágenes lo suficientemente grandes como para realizar una valoración del número de intermetálicos, en un área determinada, aunque no se llegan a distinguir los átomos que tienen un número atómico similar. Así, en la Figura 4 se identifican las respuestas del Cu pero no las del Mg.

A partir del análisis de estas imágenes ha sido posible detectar una distribución irregular de partículas intermetálicas, no sólo en su posición espacial en la superficie sino también en lo que a densidad superficial se refiere. Los valores obtenidos han permitido intuir una cierta tendencia a disminuir el número de intermetálicos por unidad de superficie al

aumentar de la velocidad de corte. Por otra parte, se produce un mayor número de estos precipitados intermetálicos en los ensayos realizados con mayor avance. De acuerdo con [5], este hecho supone una pérdida de resistencia media a la corrosión, evaluada en términos de Intensidad de Corrosión y/o Resistencia de Polarización, a partir de ensayos de polarización lineal, como consecuencia de una pérdida en la calidad superficial de las piezas mecanizadas [3,6].

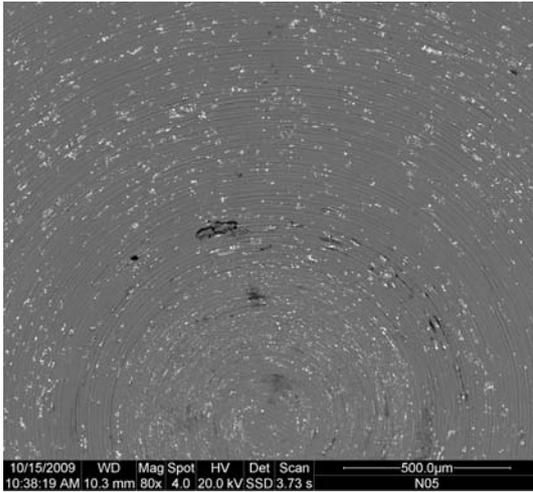


Figura 4. Imagen obtenida con técnicas de retrodispersión mostrando el metal base y los intermetálicos de base Cu.

En la figura 5 y 6 se incluyen las Curvas de Polarización Lineal obtenidas en disolución aireada de NaCl al 3.5% adquiridas sobre partes de la pieza mecanizada en distintas condiciones

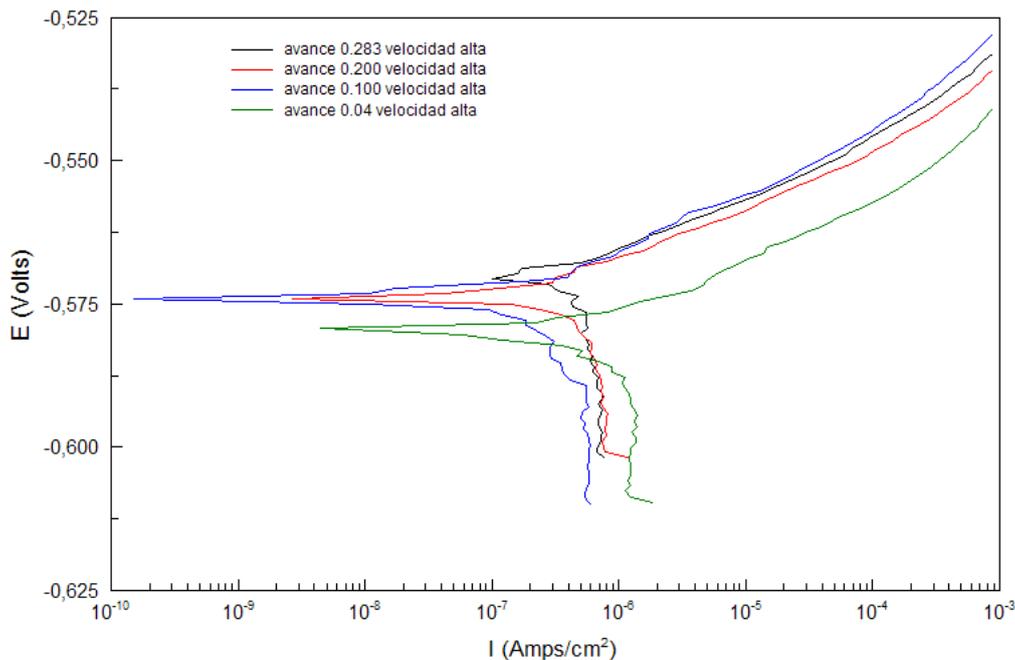


Figura 5. Diagramas de Polarización Lineal de muestras con diferente avance sometidas a polarización lineal en medio salino.

de avance (figura 5) y velocidad de corte (figura 6).

Sobre las gráficas recogidas en dicha figura pueden hacerse, en principio, dos observaciones. Por una parte, puede apreciarse cómo la velocidad de corte provoca un aumento del Potencial de Corrosión, E_{corr} , para avances iguales. Tal y como se comentó anteriormente, la velocidad de corte disminuye la densidad de intermetálicos. El carácter catódico de dichos intermetálicos [4] provoca un descenso de E_{corr} frente al potencial del aluminio puro, por lo que al aumentar la velocidad de corte se provoca un descenso del número de partículas catódicas y, por tanto, una menor disminución del potencial de corrosión de la aleación. El número de partículas presentes es más acusado con el aumento de avance, donde, además, es crítica la pérdida de calidad superficial [3,6]. En estas condiciones, la agresividad del medio se intensifica aumentándose en promedio la velocidad de corrosión, lo que se traduce en un desplazamiento de las curvas de polarización lineal hacia valores más elevados de la densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , lo que conlleva una reducción efectiva de la resistencia de polarización. De esa forma, las velocidades de corte elevadas y los avances pequeños, no sólo soportan una mayor calidad de acabado superficial de las piezas mecanizadas desde el punto de vista dimensional, sino que también permiten obtener elementos con un mejor comportamiento frente a la corrosión en medios salinos.

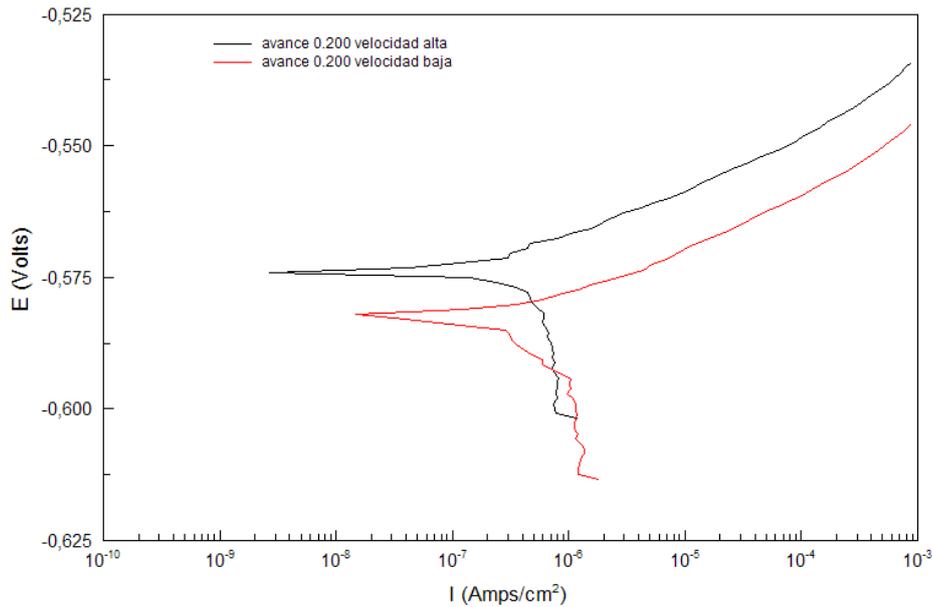


Figura 6. Diagramas de Polarización Lineal de muestras con diferente velocidad sometidas a polarización lineal en medio salino.

4. Conclusiones

Las aleaciones de aluminio de uso aeronáutico presentan problemas de corrosión localizada debido a la heterogeneidad de la microestructura de la aleación. Concretamente, en el caso de estudio, la densidad de presencia de intermetálicos de Al(Cu,Mg) en la superficie mecanizada de la aleación UNS-A92024 condiciona la resistencia a la corrosión de dicho material en medios salinos.

Los estudios realizados han puesto de manifiesto que dicha densidad varía en función de las condiciones de fabricación de las piezas, siendo especialmente sensible en el caso de procesos de mecanizados. Así, las bajas velocidades y los altos avances provocan unas mayores densidades de compuestos intermetálicos sobre la superficie de las muestras.

El carácter catódico de esas partículas provoca que en las piezas mecanizadas a bajas velocidades de corte y altos avances se obtengan desplazamientos de las curvas de polarización lineal hacia potenciales más activos (catódicos) y densidades de corriente más elevadas (mayor actividad corrosiva). De esa forma esos parámetros de corte no sólo soportan una mayor precisión microgeométrica, sino que también permiten obtener elementos más resistentes a la corrosión en medios salinos.

5. Referencias

[1] A. Aballe, M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, *Influence of the*

Degree of Polishing of Alloy AA5083 on its Behaviour Against Localised Alkaline Corrosion, *Corrosion Science*, 46 (2004) 1909-1920.

[2] B.H. Yan, Y.C. Lin, F.Y. Yuan, *Surface modification of Al-Zn-Mg alloy by combined electrical discharge machining with ball burnish machining*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (2002) 925-934

[3] E.M. Rubio, A.M. Camacho, J.M. Sánchez-Sola, M. Marcos, *Surface roughness of AA7050 alloy turned bars. Analysis of the influence of the length of machining*, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163 (2005) 682-689.

[4] M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, J.M. Sanchez-Amaya, L. Gonzalez-Rovira, *Behaviour of the alloy AA2017 in aqueous solutions of NaCl. Part I: Corrosion mechanisms*, *Corrosion Science* 51 (2009) 518-524.

[5] M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, *Influence of the Cathodic Intermetallics Distribution on the Reproducibility of the Electrochemical Measurements on AA5083 Alloy in NaCl Solutions*, *Corrosion Science* 45 (2003) 161-180.

[6] Carrilero, M.S.; Sánchez, J.M.; Bienvenido, R.; González, A.; Marcos, M.; *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (2002). 215-220

Introducción al estudio del efecto de las vibraciones en el acabado superficial de piezas mecanizadas

F. Fernández Ancio⁽¹⁾, M. Marcos Bárcenas, A.J. Gámez López⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento Mecánica de Medios Continuos C/ Virgen de África Nº 7, 41.011 Sevilla, 954552829, ancio@us.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, C/ Chile, N. 2, 11.002 Cádiz, 956015702, mariano.marcos@uca.es y antoniojuan.gamez@uca.es

Resumen

Se esquematiza el trabajo realizado por el Doctorando para la obtención del D.E.A. desarrollando el estado actual del conocimiento en relación al mecanizado de piezas (centrándose en el aluminio), las vibraciones que aparecen durante el mismo y la calidad superficial obtenida en el mismo. El objetivo es servir de base a una posterior Tesis que permita obtener una relación entre el perfil y la vibración en sus valores instantáneos y no en valores medios como aparece en las referencias bibliográficas existentes en la actualidad.

1. Introducción

El proceso de mecanizado más común en la fabricación de piezas es el torneado. Los parámetros tecnológicos del mismo y la geometría de la herramienta de corte tienen una relación directa en la calidad superficial obtenida. La puesta a punto de un proceso, implica realizar un conjunto de ensayos previos a la fabricación definitiva para definir los valores que permiten obtener la mejor relación entre material arrancado y calidad obtenida. Esta labor de planificación previa implica un coste económico que será necesario repercutir en el conjunto de piezas fabricadas. Obtener un modelo que permita estimar el perfil que se va a obtener bajo unas condiciones de corte concretas, puede reducir el tiempo y la repercusión económica de la puesta a punto del proceso.

Para el caso concreto del acero, estos modelos existen y han probado su eficacia. En el caso concreto de las aleaciones de aluminio existe discordancia entre los distintos estudios encontrados. Las aleaciones de aluminio son un material muy empleado entre otros, en el sector aeronáutico y de la automoción. Su buena relación peso/resistencia mecánica y su precio lo hacen competitivo frente a otros materiales por lo que se considera interesante seguir avanzado en su caracterización.

Un factor decisivo en la calidad superficial es la vibración que aparece en el conjunto máquina-herramienta-pieza y que modifica la distancia relativa entre la herramienta y la pieza perjudicando la calidad obtenida. Obtener una relación entre la vibración existente en un instante dado y la calidad superficial de la pieza

puede permitir realizar una estimación “on-line” del resultado del mecanizado antes de que éste termine. Incluso una vez detectada la desviación respecto a la calidad requerida, podría tomarse alguna acción que la corrija. Por esta razón se considera importante incluir la vibración como uno más de los parámetros a tener en cuenta.

Indicar por último, que las relaciones obtenidas hasta el momento hacen referencia normalmente a la rugosidad media aritmética. No aparecen estudios que relacionen de forma directa parámetros tecnológicos, vibración y perfil real que se está produciendo en ese instante. La rugosidad media aritmética, aunque muy útil por su uso extendido como parámetro de calidad, no describe con precisión el perfil obtenido durante el mecanizado y puede no ser suficiente en determinadas ocasiones. Obtener una estimación del perfil real tras el mecanizado puede ser una nueva e interesante línea de trabajo.

2. Antecedentes

A principios de los 70 ya aparecen trabajos donde se relaciona la calidad superficial de la pieza mecanizada con las variables del proceso, siendo de las primeras estudiadas la geometría de la herramienta y el avance [1]. Pero para caracterizar mejor el proceso, otros factores se van incorporando paulatinamente: el material de la herramienta y de la pieza, el tipo de máquina herramienta y la velocidad de corte [2]. El acero ha sido el material sobre el que más trabajos se han realizado lo que ha permitido caracterizar completamente su respuesta ante situaciones distintas de trabajo. Incluso hoy en día siguen apareciendo aportaciones en esta dirección [3]

lo que indica que sigue siendo una línea de investigación plenamente vigente.

Para este material los parámetros que se manifiestan como más influyentes son la velocidad de corte y el avance seguidos del radio de la punta de la herramienta y la profundidad de corte. De forma casi unánime, se observa que la rugosidad disminuye al aumentar la velocidad de corte y el radio de la punta de la herramienta y que disminuye al aumentar el avance. La profundidad de corte es la que menos influencia presenta y depende de en qué márgenes se muevan el resto de parámetros.

A continuación aparecen trabajos que estudian la influencia de factores como la rigidez de la máquina-herramienta [4], la rigidez de la herramienta y su sistema de fijación y soporte [5], la posición de la herramienta respecto al eje de la pieza, el material mecanizado con su pasado tecnológico [6], la esbeltez de la pieza [5] o el número y profundidad de las pasadas necesarias [6]. Sin embargo, aunque las conclusiones en el grupo anterior eran extensibles a casi todos los estudios, este grupo se caracteriza por una gran heterogeneidad en sus resultados haciendo casi imposible obtener una regla aplicable cuando las condiciones difieren de las ensayadas.

Otro material que se ha estudiado son las aleaciones de aluminio aunque en menor medida. Se ha probado el efecto normalmente perjudicial que provoca en la calidad de la pieza aumentar la velocidad y el avance [7] y que el aumento de la longitud de corte mejora la calidad de la pieza, circunstancia que se ha estudiado en el caso concreto de las aleaciones AA2024 y AA7050 [8]. Pero no todas las conclusiones sobre este material son unánimes. Existen estudios que señalan el efecto favorable que el aumento de la velocidad de corte puede provocar sobre el acabado superficial en oposición a lo anterior [9] y otros que indican que la combinación que produce los mejores resultados de calidad superficial son velocidades de corte bajas con avances altos [10]. Esto demuestra que es necesario ampliar la investigación en esta línea.

La inclusión de la vibración relativa herramienta-pieza es otra de las líneas de investigación que ha cobrado un especial interés en la última década. Las formas de incorporarla son diversas siendo las que han demostrado una mayor versatilidad y acierto, las que pasan por hacer un análisis espectral de la aceleración que experimenta la punta de la herramienta.

La metodología más utilizada ha sido la realización de un conjunto de ensayos modificando los parámetros de corte y la geometría de la herramienta y registrando como salida rugosidad y aceleración. Con estos datos

se proceden a elaborar modelos de predicción de la rugosidad que incorporen la vibración como una más de las variables, utilizando los ensayos ya hechos u otros nuevos para garantizar la fiabilidad del mismo. Esta línea se ha seguido tanto en el caso del acero [11] como en el del aluminio [12].

Una vez obtenidos los modelos, una aplicación muy interesante es la predicción “on-line”. El análisis espectral de la señal de los acelerómetros puede realizarse en tiempo real lo que permite tener una previsión casi instantánea de la rugosidad que se está produciendo durante el mecanizado. Incluso en el caso de la utilización de tornos de control numérico podría actuarse sobre los parámetros del mecanizado para devolver la rugosidad a los valores admisibles [13, 14].

3. Calidad superficial y rugosidad

Cuando se habla de calidad superficial, se engloban dos aspectos: la desviación dimensional y la rugosidad (entendida como término genérico) y dentro de ésta última, entre ondulación y rugosidad (entendida como desviación del perfil respecto a la línea media). El parámetro más utilizado para medir la calidad superficial es Ra (desviación media aritmética). Sin embargo, al tratarse de una media, se pueden encontrar dos perfiles completamente distintos con valores similares de Ra y que sin embargo presentarían comportamientos muy dispares en el uso al que estén destinados. Si se quiere caracterizar con más detalle el perfil resultante, se debe recurrir necesariamente a obtener otros parámetros además del anterior. Algunos investigadores toman aquí la decisión de recurrir a la UNE-EN ISO 4287 y apoyarse en términos como factor de asimetría o factor de aplastamiento [15]. Otros toman el camino de utilizar las FFT (Transformada rápida de Fourier, en inglés Fast Fourier Transform) para transformar el perfil en una función en el dominio de la frecuencia y estudiarla con más detalle [16]. También existen trabajos que identifican qué parámetros de rugosidad en 2D o 3D serían los más adecuados para caracterizar una superficie en función del uso o destino de la pieza [17]. Lo que no se ha hecho todavía es estudiarla con las WT que permitiría una mejor caracterización cerca de las zonas de mayores irregularidades.

En el estudio de la rugosidad debe distinguirse entre rugosidad ideal y rugosidad natural [18]. La ideal es el resultado de la geometría de la herramienta y de la velocidad de avance. La natural es el resultado de las irregularidades en el proceso de corte, tales como vibraciones, defectos en la estructura del material, desgaste

de la herramienta e irregularidades en la formación de la viruta, entre otras.

Para poder realizar un estudio más detallado, la UNE-EN ISO 4287 descompone el perfil en perfil de rugosidad, de ondulación y primario. Para ello, utiliza la definición de filtro de perfil como “*filtro que separa el perfil en componentes de longitud de onda larga y componentes de longitud de onda corta*”, esto último apoyándose en la ISO 11562. Así, el perfil de una superficie puede ser dividido en rugosidad, ondulación y error de forma o desviación (fig. 1) [6]. La rugosidad estaría causada por las marcas de la punta de la herramienta (de carácter periódicas en unos procesos y no periódicas en otros), el arranque o desgarrado del material durante el corte, la incorporación del material mecanizado a distintas zonas de la herramienta (built-up edge y built-up layer), la incorporación de partículas de la herramienta a la superficie de la pieza mecanizada y la forma de la rotura de la viruta sobre la punta de la herramienta. Las ondulaciones estarían causadas por las características propias de la máquina como balanceos de la herramienta, irregularidades en el avance, falta de rigidez, etc... y los errores de forma o desviaciones macrogeométricas se deberían a una insuficiente rigidez del sistema de agarre de la pieza, deformación de la pieza debido a las fuerzas de corte, inadecuadas guías o correderas usadas para el guiado de la herramienta o la pieza y por último, relajación de las tensiones internas que poseía la pieza por tratamientos u operaciones anteriores.

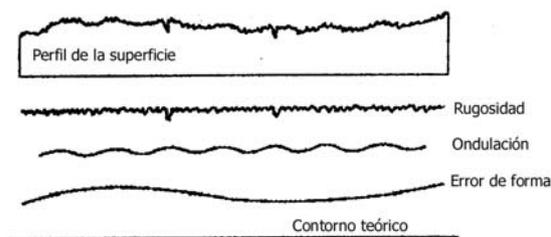


Figura 1. Descomposición del perfil en función de sus irregularidades. Adaptada de [6].

El procedimiento operativo más habitual para poder realizar la clasificación anterior es recurrir al análisis espectral de la superficie mecanizada delimitando los distintos perfiles en función de filtros pasabandas de longitud de onda adecuada. El tratamiento convencional está basado normalmente en el análisis de la rugosidad donde la ondulación ha sido previamente eliminada. Sin embargo, este procedimiento presenta el inconveniente de que la ondulación tiene una gran importancia en aspectos como la tribología o sobre las

características metalúrgicas de la superficie de la pieza [19].

4. Estado del Arte en el mecanizado del aluminio

El aluminio, en sus diversas formas comerciales, ha sido estudiado aunque con menor profusión que el acero. Para establecer diferencias entre distintos materiales, éstos se ensayan bajo unas mismas condiciones y se comparan los resultados obtenidos. Así se han realizado estudios comparando acero 8620 de HRB 86 con aluminio 6061T de HRB 52 bajo distintas condiciones de avance, profundidad, velocidad, tiempo de corte y geometría [20], o barras de acero colado dúctil, acero al carbono, aleación de aluminio e Inconel variando la velocidad de corte, el avance y el radio de la punta de la herramienta [9], o barras de aluminio y cobre con distintos valores de velocidad de corte, profundidad, avance, geometría de herramienta y tipo de inserción [21].

La conclusión unánime es que es el avance el parámetro que más influye en la calidad superficial obtenida empeorando ésta a medida que aumenta el mismo [13, 14], matizada en algunos casos por el rango de la variable [7] en donde se observa una tendencia a la disminución de la rugosidad hasta avances de 0,2 mm.p.r. para comenzar a crecer a partir de este valor de avance, todo ello dentro de los rangos habituales de velocidad. Completando este estudio en el caso de microtorneados, y para aleación de aluminio A15083-H116, se ha demostrado que por debajo de un cierto valor de avance, el perfil de la pieza presenta peores características [22]. Se atribuye al flujo plástico lateral causado por el gradiente de deformación justo delante de la herramienta al existir un mínimo espesor de corte por debajo del cual, no hay arranque de material y la herramienta fricciona sobre la pieza pero no corta, haciendo que una pequeña porción de material sea dejada atrás, perjudicando la calidad del mecanizado.

Las conclusiones no son sin embargo unánimes en el caso de la influencia de la velocidad. Sobre barras de aleación aluminio-cobre UNS-A92024, en operaciones de torneado en seco, se ha descubierto que en forma contraria a lo que sucede en barras de acero, al aumentar la velocidad de corte se produce un ligero incremento de la rugosidad [7], circunstancia corroborada sobre barras de aluminio 6061-T6511 [13] y sobre aluminio 6061 [14]. Pero en oposición a estas líneas aparecen algunos estudios como el realizado para aluminio 390 de BHN 73 en el que aparece una mejora de la calidad al aumentar la velocidad [9, 23].

En relación a la geometría de la herramienta de corte, el parámetro más importante es el radio de la punta y se destaca que aumentar su valor mejora la calidad del perfil obtenido en el mecanizado [9, 23]. Aunque coincidente dentro de los rangos habituales, para el caso de torneados de ultraprecisión, existen estudios que demuestran que aumentar el radio conduce a calidades inferiores [21].

También la longitud de torneado y el tiempo de mecanizado se muestran influyentes. La experiencia acumulada en piezas de acero demuestra que a medida que aumenta la longitud mecanizada se va produciendo un paulatino desgaste de la herramienta y por lo tanto un incremento de la rugosidad. Sin embargo esta circunstancia no ocurre para el caso de barras torneadas de aleaciones de aluminio AA2024 y AA7050 [8, 24]. Se ha demostrado que a medida que la longitud aumenta, la rugosidad de la pieza decrece. La causa se encuentra en las adhesiones del material sobre la cara de corte de la herramienta (built-up layer) y sobre el filo de corte de la misma (built-up edge) que producen una o varias capas de material adherido sobre la herramienta, modificando la geometría de la misma y suavizando el perfil resultante del mecanizado [25].

Por último destacar que en el caso concreto de las aleaciones de aluminio, ha sido destacada la idoneidad de utilizar modelos no lineales frente a los lineales [20], circunstancia que debe ser tenida en cuenta para planificar adecuadamente los ensayos.

5. Vibraciones en el mecanizado

Las vibraciones son un factor inherente a toda máquina herramienta. No existe la posibilidad de diseñar una “libre” de ellas. Con el paso del tiempo, la tecnología ha ido avanzando en la dirección de su disminución pero también es cierto que el aumento de las prestaciones (mayores velocidades, mayores posibilidades de fuerza de corte, materiales más resistentes, etc,...) acentúan su efecto. Las vibraciones afectan a la vida de la herramienta, a la exactitud dimensional de la pieza, a la rugosidad superficial y disminuyen la producción [13].

Una posible clasificación sería por su origen dividiéndose en tres grandes grupos [26]. El primero tiene su origen en la propia máquina y puede deberse a desequilibrios en las masas, a un mal ajuste de los cojinetes, desgaste de piezas, mal diseño, inadecuada rigidez, etc... El segundo se debe a la variación de las fuerzas de corte. El tercero se debe a las vibraciones de la cimentación.

Obtener un modelo teórico que explique las vibraciones que aparecen en una máquina herramienta, es una labor muy complicada y que escapa al objetivo de este trabajo. Simplemente se elaborará un pequeño resumen de cómo han sido incluidas en los distintos trabajos.

Las primeras referencias a la necesidad de incluir la vibración en el estudio de la rugosidad se sitúan a primeros de la década de los 70 [1] cuando se indica que la rigidez de la máquina, la de la herramienta y su posición no pueden obviarse sino que deben de añadirse en el conjunto de variables del proceso.

El modo habitual para incorporar la vibración al estudio de la calidad es determinar la posición de la herramienta respecto a la pieza y que permitirá determinar el perfil real tras el mecanizado en vez de el perfil teórico procedente de la intersección entre el filo de la herramienta y la pieza y que puede obtenerse a través de un estudio teórico en el que intervienen la forma de la herramienta, el avance y la profundidad de corte.

El desplazamiento de la herramienta de su posición teórica puede obtenerse a través de su vibración relativa mediante una sonda electromagnética [27]. Se determinaría así, en cada giro de la pieza, la posición exacta de la punta de la herramienta y de él, el perfil real de la misma. Para evitar que las virutas se encajen entre la punta del palpador y la pieza falseando los resultados, sería necesario disponer una corriente de aire a presión entre ambos. Una alternativa a este procedimiento sería por doble integración de la aceleración tomada a través de un acelerómetro situado en la herramienta.

Otro tratamiento para incluir el efecto del desplazamiento relativo herramienta-pieza ha sido incluir como variable del proceso el valor medio del desplazamiento [27] en vez del valor instantáneo.

Una alternativa al tratamiento de la vibración a través de los valores medios es pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (mediante FFT normalmente) a través del análisis espectral de las señales procedentes de los acelerómetros. Este análisis en frecuencia permite obtener en la señal los posibles patrones de repetición de la misma y una información mucho más detallada que aquella que se extrae de su valor medio o de su media cuadrática. Así, un camino para estudiar el efecto de las vibraciones en la rugosidad de la pieza sería realizar un conjunto de ensayos modificando los parámetros tecnológicos habituales y registrando como salida rugosidad y vibración. Con estos datos, el paso siguiente sería obtener un modelo de predicción que incorpore la vibración como una más de las variables y que

utilice los resultados de los distintos ensayos para garantizar su fiabilidad.

Esta técnica se ha utilizado con éxito en el caso de barras de acero de $f_y = 225$ MPa. donde los ensayos previos se realizaron modificando avance, velocidad y profundidad de corte y radio de la punta de la herramienta y considerando sólo las aceleraciones radial y en el sentido de avance [11]. A través de un análisis regresivo se obtuvieron y compararon cuatro modelos distintos demostrando que los dos que incorporaban la información extraída del análisis espectral de la señal de los acelerómetros poseían menores desviaciones en la predicción del perfil (en sus valores de R_a , R_{sk} y R_t) que los dos que sólo contemplaban los parámetros tecnológicos y la geometría de la herramienta. La mejora en la predicción siguiendo esta línea se ha manifestado también en otros trabajos [12, 13, 14, 28, 29]. Una vez obtenido el modelo, una aplicación muy interesante es la predicción “on-line”. El análisis espectral de la señal de los acelerómetros puede realizarse en tiempo real lo que permitiría tener una previsión casi simultánea de la rugosidad que se está produciendo en el mecanizado [30].

El aluminio ha sido un material estudiado utilizando las vibraciones producidas durante el mecanizado [10, 12, 13, 14, 31]. Se destaca que las variables que más influyen en el resultado final del proceso son el avance seguido de las vibraciones [12, 14]. Las aceleraciones que más influyen son la tangencial y la existente en la dirección de avance [13, 14]. Los mejores resultados de calidad superficial se han obtenido con valores bajos de velocidad de corte y avances altos [10] en una clara discordancia respecto al acero. La rugosidad aumenta al aumentar la profundidad de corte y existe un valor concreto de radio de la herramienta que produce la menor rugosidad, aumentado la misma si nos alejamos de él a diferencia del acero que mejora la rugosidad siempre que aumenta el radio [10]. La influencia de la velocidad y profundidad de corte, el avance y el radio de la punta de la herramienta han sido estudiado por separado, en interacciones dos a dos e incluso tres a tres pero las conclusiones no son unánimes. Como ya se ha comentado anteriormente, mientras que en unos casos se destaca la relación fundamentalmente lineal y la escasa interacción entre ellos [12], en otros se indica la relación no lineal y la influencia de las interacciones [10].

La rigidez del torno es también un elemento importante en la valoración de la vibración. Sin embargo su efecto está muy relacionado con el rango en el que se muevan el resto de parámetros y especialmente el avance. Concretamente se ha demostrado que para

valores de avance superiores a los 0,15 mm/rev, la diferencia de rigidez entre tornos no influye sobre el resultado final siendo para avances del orden de 0,05 mm/rev cuando la disminución en la rigidez provoca un aumento en las vibraciones y una bajada de la calidad superficial [29].

6. Metodologías y herramientas utilizadas

Un aspecto interesante es el que afecta a las herramientas de tratamiento de datos utilizadas en los diferentes estudios. Mientras que en los primeros trabajos los resultados se muestran en simples gráficos o tablas que relacionan las variables de entrada con el resultado obtenido, pronto aparecen los estudios basados en análisis regresivos [32] cuyo objetivo es obtener una ecuación que relacionase factores con resultado. Especialmente interesante es este camino cuando se aumenta el número de variables que entran en juego y la relación no es lineal o cuando aparecen interacciones entre las variables porque la representación mediante gráfica no permite visualizar tan claramente estos matices. Si se busca obtener el valor óptimo, la herramienta a utilizar sería entonces la metodología de la superficie respuesta (RSM, Response Surface Methodologic por sus siglas en inglés) [33].

En los últimos 10 años ha habido sin embargo un cambio sustancial. En los distintos trabajos han ido ganando peso las técnicas de tratamiento de datos y la planificación de los ensayos. ANOVA (del inglés Analysis of Variance) [33], redes neuronales (NN de Neural Networks) y las redes neuronales artificiales (ANN de Artificial Neural Network) [34], Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms) [35], lógica difusa (fuzzy logic) y los conjuntos nebulosos o borrosos (fuzzy sets) [36], Taguchi [37], etc., son potentes herramientas puestas al servicio de la interpretación de los resultados. Los frutos demuestran que su aplicación permite obtener mejores resultados con un menor esfuerzo y coste de ensayos.

7. Conclusiones

El diseño implica un compromiso entre múltiples factores. Llegar a alcanzar la solución óptima exige en muchas ocasiones solucionar conflictos entre los distintos requisitos de función, material, proceso de fabricación y terminación. Cuando se desciende al nivel de producción, se vuelve a tener que plantear la necesidad de alcanzar la mejor relación entre la ratio de producción, la calidad superficial exigida y el coste que ello implica. Estos tres factores están íntimamente ligados entre ellos y cualquier variación en uno afectaría a los otros.

Aquí radica la importancia de establecer adecuadamente una previsión de la calidad superficial que se va a obtener en un proceso de mecanizado concreto, para unos requisitos concretos de tasa de material removido (lo que afecta a la economía global de la producción) y en el menor tiempo y al menor coste posible de ensayos.

Obtener una relación entre el perfil resultante y los parámetros tecnológicos y la vibración existente se plantea como una línea de investigación muy interesante. La escasa y no siempre concordante información en el caso de aleaciones de aluminio y la incorporación de este material a las industrias del automóvil y la aeronáutica acentúan este interés. Enfatizar este estudio en la relación entre vibración y perfil instantáneo que se produce (en vez de utilizar valores promedios como sería el caso de Ra) sería dotar a la investigación de una vertiente totalmente novedosa.

8. Objetivos de la Tesis

Además de lo comentado anteriormente, para la futura tesis se han establecido los siguientes objetivos:

- Elaborar una síntesis del conocimiento actual sobre el mecanizado de este tipo de aleaciones analizando las líneas seguidas en otras investigaciones y proponiendo nuevos caminos para avanzar en su mejor conocimiento
- Establecer un protocolo de elaboración de ensayos que abarque las condiciones habituales de mecanizado en piezas de este material
- Elaborar una metodología de tratamiento de datos que sería aplicada a los resultados obtenidos de los ensayos anteriores
- Generar un modelo de predicción de la rugosidad que se obtendría bajo unas condiciones concretas de mecanizado, lo más fiable posible y que contemple todas las variables que afectan al proceso incluyendo la vibración

6. Referencias

[1] Fischer, H. L.; and Elrod, J. T. . *Microtecnic* , 25 (1971) 175.
 [2] Rasch, F. O.; and Rolstadas, A. . *Ann CIRP* , 19 (1971) 787.

[3] Thangavel, P.; and Selladurai, V. . *Int J Prod Res*, 3 (2008) 285.
 [4] D. Y. Jang and A. Seireg. , *A.S.M.E. (DE)*,1989 18
 [5] Selvam, M. S. . *Wear* , 35 (1975) 149.
 [6] Kopač, J.; and Bahor, M. . *J Mater Process Tech*, 92-93 (1999) 381.
 [7] Marcos-Bárcena, M., et al . *J Mater Process Tech*, 162-163 (2005) 644.
 [8] J. M. Sánchez-Sola. *Análisis Paramétrico del Mecanizado de Aleaciones de Aluminio. Relación Con la Topografía de las Muestras Mecanizadas*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2004.
 [9] Mital, Anil; and Mehta, Manish . *Int J Prod Res*, 26 (1988) 1861.
 [10] Cheung, C. F.; and Lee, W. B. . *Int J Mach Tool Manufact*, 40 (2000) 979.
 [11] Abouelatta, O. B.; and Mádl, J. *J Mater Process Tech*, 118 (2001) 269.
 [12] Huang, L.; and Chen, J. C. . *J Ind Tech*, (2001). 172
 [13] Kirby, E. D.; and Chen, J. C. . *Comput Ind Eng*, 53 (2007) 30.
 [14] Zhang, J. Z.; Chen, J. C. and Kirby, E. D. . *J Intell Manuf*, 18 (2007) 301.
 [15] Wu, J. -J . *Tribol Int*, 37 (2004) 339.
 [16] Raja, J.; and Radhakrishnan, V. . *International Journal of Machine Tool Design & Research* , 19 (1979) 133.
 [17] Coutinho, R.; and Marinescu, I. D. . *Machining Science and Technology* , 9 (2005) 383.
 [18] Boothroyd, G.; and Knight, W.A. "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Marcel Dekker, New York, 1989.
 [19] O'Connor, R. F.; and Spedding, T. A. *Int J Mach Tool Manufact* , 32 (1992) 147.
 [20] Wang, X.; and Feng, C. X. . *Int J Adv Manuf Tech*, 20 (2002) 348.
 [21] Zhong, Z. W.; Khoo, L. P. and Han, S. T. *Mater Manuf Process*, 23 (2008) 92.
 [22] Liu, K.; and Melkote, S. N. . *Int J Mach Tool Manufact*, 46 (2006) 1778.
 [23] Hayajneh, M. T. . *Machining Science and Technology* , 9 (2005) 437.
 [24] Rubio, E. M., et al . *J Mater Process Tech*, 162-163 (2005) 682.
 [25] Sánchez, J. M., et al *J Mater Process Tech*, 164-165 (2005) 911.
 [26] Lin, S. C.; and Chang, M. F. . *Int J Mach Tool Manufact*, 38 (1998) 763.
 [27] Jang, D. Y., et al *Int J Mach Tool Manufact*, 36 (1996) 453.
 [28] Kohli, A.; and Dixit, U. S. *Int J Adv Manuf Tech*, 25 (2005) 118.
 [29] Li, H.; Wu, S. and Kratz, H. . *Tsinghua Science and Technology* , 12 (2007) 441.

- [30] Risbood, K. A.; Dixit, U. S. and Sahasrabudhe, A. D. . *J Mater Process Tech*, 132 (2003) 203.
- [31] Cheung, C. F.; and Lee, W. B. . *Int J Adv Manuf Technol* , 19 (2002) 245.
- [32] Draper, N. R.; and Smith, H. "Applied Regression Analysis", Wiley, New York, 1981.
- [33] Box, G. E. P.; and Wilson, K. B. *J Roy Stat Soc*, 13 (1951) 1.
- [34] Gill, P.E.; Murray, W.; Wright, M.H. "Practical Optimization", Academic Press, London, 1981.
- [35] Goldberg, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, Mass. 1989.
- [36] Tsoukalas, L.H. "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley, New York, 1997
- [37] Taguchi, G. "System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost", UNIPUB. White Plains, New York, 1987.

La Eficiencia Energética como Catalizador de la Productividad de la Industria de Fabricación

S. Rondán de La Rosa⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾, M.A. Sebastián Pérez⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz Chile, 1, 956 015142, serafin_rondan@hotmail.com.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Escuela Superior de Ingeniería de Cádiz

⁽³⁾Departamento de Ingeniería de Construcción Fabricación. ETSII. UNED

Resumen

La Eficiencia Energética, y en concreto su gestión, constituye un factor estratégico fundamental para mejorar los niveles de productividad y competitividad. Más allá del ahorro energético se encuentra la capacidad de la eficiencia energética como catalizador de la productividad. A través del modelo matemático de esta relación y de su simulación, se mostrará cómo las acciones de mejora que más productividad producen son aquellas que presentan más sinergias en el proceso completo.

1. Introducción

El presente artículo se encuentra enmarcado dentro del trabajo de investigación relacionado con el proyecto de tesis doctoral "*Metodología General para la Gestión de la Eficiencia Energética en los Sistemas Motor*".

La necesidad de abordar la eficiencia energética de las plantas de fabricación, desde una metodología sistemática y global, se evidencia observando la evolución de la intensidad energética industrial a lo largo de los últimos años. Al comprobar cómo la intensidad energética industrial española presenta una variación contraria al resto de los países de la UE, se hace necesario detallar las claves de la optimización energética, en concreto de la eléctrica [1].

A través del estudio de esas claves se concluye que una metodología general para la gestión energética de la planta necesita un enfoque por sistemas y no por procesos. Así mismo se establece que el aspecto que determina con mayor grado la eficiencia del proceso es cómo se está produciendo, más allá incluso del rendimiento de cada uno de los equipos individualmente. Sin embargo se observa que una de las principales barreras que impiden la implantación de las herramientas necesarias para realizar una gestión energética adecuada es la escasa importancia con la que se percibe a la eficiencia energética [2]. Por tanto, previo a desarrollar de manera exhaustiva una metodología para la gestión energética, se hace necesario mostrar con claridad la vinculación entre eficiencia energética y productividad, así como su alta capacidad de generar ventaja competitiva. Esta relación unívoca entre

productividad y eficiencia energética se desarrollará mediante un modelo matemático.

Tradicionalmente, tanto en la industria como en otros sectores productivos, se identifica eficiencia con ahorro. Esto no deja de ser un punto de vista sesgado, ignorando la importancia que puede alcanzar la observancia de la eficiencia energética en la productividad y, por tanto, en la competitividad de la industria.

En la industria de fabricación, el gasto medio en la adquisición de un sistema representa, a lo largo de su vida útil, el 20% de su coste, mientras que su consumo energético alcanza el 80%. Igualmente, su consumo depende más de cómo se produce que de cómo se mantiene. Por tanto, la gestión energética de la planta, dentro de la misma lógica, deberá estar a cargo del departamento de fabricación, condicionando el cómo se produce a las funciones de ingeniería, compra y mantenimiento.

A pesar de que lo expuesto tiene suficiente relevancia, es otro el aspecto que convierte a la eficiencia energética en fundamental: su capacidad catalizadora de la mejora de la eficiencia del proceso de fabricación completo. Considérese el ejemplo: Para reducir el consumo de combustible de un automóvil se debería cuestionar si se conduce a una velocidad excesiva, si se acelera bruscamente en las salidas y los adelantamientos, si se opta por el recorrido más corto aunque el asfalto no sea el más conveniente, si se realiza un plan de mantenimiento adecuado... Es decir, al observar la eficiencia energética del automóvil no se está analizando la calidad de los combustibles, el diseño mecánico de los inyectores o la rugosidad del acabado de la biela. Se pregunta

por cómo se conduce y modificando el estilo de conducción se mejorará la eficiencia energética del vehículo.

Como resultado de este análisis se reducirá el consumo, pero también se reducirá el desgaste de las pastillas de freno y de los neumáticos, por lo que se alarga su vida útil. Lo mismo ocurrirá con la caja de cambios, la transmisión, etc. Es decir, al beneficio de la reducción del consumo se le añade la prolongación de la vida útil de los componentes, un mejor estado de la maquinaria, un menor coste de mantenimiento...

Igualmente, en un proceso de fabricación, la gestión energética del mismo requerirá el análisis de cómo se está produciendo. El rendimiento energético de la planta se mejorará a través de la optimización de cómo se adecua el proceso a la demanda concreta en cada momento. Evidentemente habrá que analizar cómo se mantiene y cómo se compra la energía, pero las mejoras que estos dos aspectos pueden aportar serán, a lo largo del ciclo de vida del proceso, marginales respecto al potencial que tiene la optimización del proceso.

En resumen, la gestión energética de las plantas redundará en la mejora del rendimiento de las mismas en dos planos: un menor consumo energético y la optimización del proceso.

La intensidad energética se entiende como cantidad de energía consumida por unidad de producto, y equivale a la inversa de la productividad. Disminuir la energía empleada disminuye la intensidad energética, incrementando la productividad. Este efecto es más que lineal, dado que para reducir la intensidad energética se ha debido mejorar el proceso; lo que producirá, a su vez, un aumento de la productividad.

Es ahí donde reside el poder catalizador de la gestión energética. La gestión energética plantea problemas que deben resolverse analizando el proceso de fabricación completo desde una perspectiva global.

2. Metodología Experimental

El parámetro fundamental que mide la eficiencia con la que se emplea la energía es la intensidad energética, que se define como la cantidad de energía que se requiere para la obtención de una unidad de PIB industrial. Actualmente, el criterio aconsejado por la Agencia Internacional de la Energía es que el PIB se exprese en euros del año 2000.

$$I = \frac{\text{Energía Consumida}}{\text{PIB}} \quad (1)$$

Se define productividad como la inversa de la intensidad energética.

$$P = \frac{1}{I} \quad (2)$$

Por tanto, se establece una relación directa entre gestión energética y productividad. Sin embargo la relación es más que lineal, debido al efecto catalizador anteriormente expuesto.

Se modela el aumento de la productividad producido por un conjunto de mejoras en el entorno de la eficiencia energética como:

$$\frac{P_j}{P_{j-1}} = 1 + \sum_{i=1}^n e^{-\gamma_i} \left(\frac{E_{j-1_i} - E_{j_i}}{E_{j-1_i}} \right)^{\sigma_i} \quad (3)$$

$$\gamma, \sigma \geq 0$$

Donde:

- P_j es la productividad en el momento j .
- γ_i es el *Factor de Degradación* de cada mejora. Guarda relación con, en función del plan de mantenimiento, cómo esa acción de mejora verá reducido su efecto debido al coste o la complejidad del mantenimiento. La tabla I muestran valores tipo para γ_i .
- E_{ji} es el ahorro energético producido en el momento j con la mejora i .
- σ_i es el *Factor de Sinergia*. Expresa la capacidad catalizadora de la gestión energética. La Tabla II se muestran valores tipo para σ_i .

A la expresión (3), así como a los valores de los coeficientes γ y σ se llega a través de aproximaciones sucesivas. El modelo matemático de la productividad tiene consistencia siempre que se produzca un ahorro energético, es decir, siempre que $E_2 < E_1$.

Se simulará el comportamiento de 4 plantas que realizan actuaciones de eficiencia energética. Se variará cada vez una variable, y se estudiará el comportamiento que esta variación provoca en la productividad a los largo de 10 años.

Tabla I. Valores Tipo del Factor de Degradación.

γ_i	Tipo de Mantenimiento
0 – 0,1	Mantenimiento Ideal. Los nuevos protocolos de mantenimiento no merman la Productividad
0,1 – 0,5	Mantenimiento Estándar. La adopción de nuevos protocolos de mantenimiento es sencilla
0,5 – 0,9	Mantenimientos que requieren un importante esfuerzo de adaptación. Aún así, se consiguen aumentos de productividad interesantes
0,9 – 2,5	Mantenimiento complejo. Gran parte de la productividad se pierde a causa de los protocolos de mantenimiento necesarios
> 2,5	Mantenimiento excesivamente complejo. Se anulan las productividades producidas por los ahorros energéticos

Tabla II. Valores Tipo del Factor de Sinergia

σ_i	Sinergia resultante
0 – 0,6	Las medidas de ahorro producen sinergias exponenciales
0,6 – 1	Las medidas de ahorro producen sinergias significativas
1 – 1,5	Las medidas de ahorro producen sinergias poco significativas
>1,5	Las medidas de ahorro no producen sinergias. Muy al contrario se producen interacciones que provocan que se neutralice el aumento de la productividad

3. Resultados y Discusión

En una primera simulación (tabla III), se determina que las 4 plantas reducen su consumo anual en un 1% cada año. Se supondrá que las medidas de mantenimiento no penalizan los ahorros producidos, por lo que se tomará un valor del Factor de Degradación de 0,25.

En la figura 1 puede observarse cómo las actuaciones de optimización energética pueden producir grandes incrementos de productividad con un Factor de Sinergia casi ideal (Planta A) y cómo actuaciones poco sinérgicas van a producir escasos incrementos de productividad (Plantas C y D).

Tabla III. Primera Simulación.

	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
γ	0,25	0,25	0,25	0,25
E2	99	99	99	99
E1	100	100	100	100
σ	0,4	0,6	1	1,5

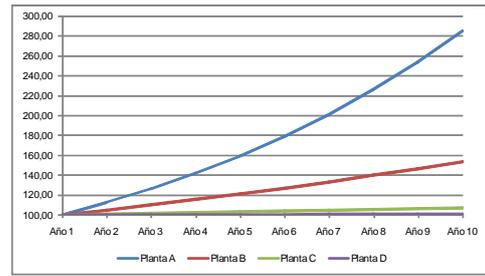


Figura 1. Variación de la Productividad con el Tiempo en función de σ

Para la segunda simulación se mantendrá ahora fijo el Factor de Sinergia y se variará el Factor de Degradación (tabla IV).

Tabla IV. Segunda Simulación.

	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
γ	0,25	0,75	1,5	4
E2	99	99	99	99
E1	100	100	100	100
σ	0,75	0,75	0,75	0,75

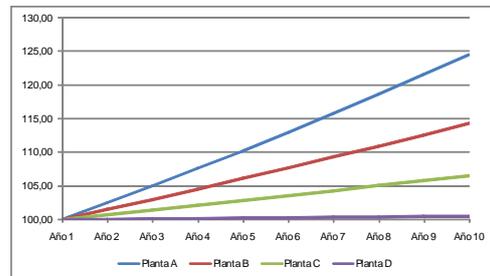


Figura 2. Variación de la Productividad con el Tiempo en función de γ

En la figura 2 puede observarse cómo medidas que no contemplen un adecuado plan de mantenimiento (Planta D) no verán cómo el ahorro energético se traduce en productividad.

En la tercera simulación se tiene una Planta A que varía su productividad según los parámetros de la Tabla V. Partiendo de la Planta A, la Planta B ha optado por mantener el nivel de ahorro energético anual y el Factor de Degradación, pero mejorando el Factor de Sinergia. Por el contrario, la Planta C desarrolla medidas de ahorro energético que reducen el consumo en la misma cantidad, con el mismo σ , pero mejorando sensiblemente γ . Finalmente, la Planta D opta por implementar medidas con el mismo γ y σ que la Planta A, pero ahorrando un 2% anual, es decir el doble.

Tabla V. Tercera Simulación.

	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
γ	0,75	0,75	0,5	0,75
E2	99	99	99	98
E1	100	100	100	100
σ	0,75	0,6	0,75	0,75

Los resultados se muestran en la Figura 3. Se observa cómo las medidas que generan mayor productividad son aquellas que producen una mayor sinergia. Si se deben priorizar medidas de eficiencia energética, aquellas que produzcan una mayor sinergia con el proceso (Planta B) deberán ser preferentes frente a aquellas que proporcionan mejores mantenimientos (Planta C) e, incluso, frente a otras medidas que produzcan ahorros mayores pero sinergias menores (Planta D).

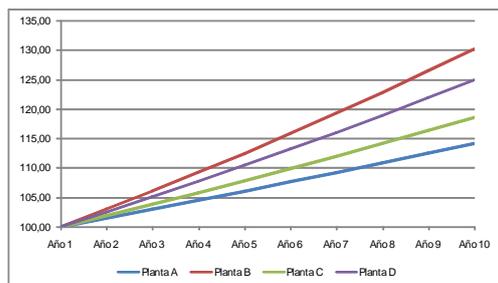


Figura 3. Variación de la Productividad en Función de las Medidas Adoptadas

En cualquier caso, para una correcta estimación de los factores de degradación y sinergia se hace imprescindible un buen conocimiento del proceso y cómo las medidas de optimización energética le afectarán. O lo que es lo mismo, es el departamento de fabricación sobre el que debe descansar la gestión y supervisión energética de la planta para que los ahorros se traduzcan en mayores productividades y, consecuentemente, una mayor competitividad. Este orden de prioridades incide en la necesidad de no ver los equipos como máquinas aisladas sino como eslabones de un proceso global con rendimientos interdependientes.

4. Conclusiones

La industria de fabricación debe adoptar una visión de la eficiencia energética que vaya más allá de un simple ahorro y debe percibirla como una gestión que se correlaciona directamente con la productividad, lo que la convierte en estratégica. Las medidas energéticas adoptadas, perderán gran parte de su potencial si se realizan desde el sesgado punto de vista del ahorro.

No obstante, el potencial fundamental de la eficiencia energética no está en el ahorro energético que produce, sino en la acción catalizadora que tiene sobre el incremento de la productividad. Una acción de eficiencia energética requerirá del análisis del proceso de fabricación, concretamente de cómo se está produciendo y cómo se adapta la capacidad de la planta a la demanda en cada momento

concreto. Como resultado, las acciones de eficiencia energética tendrán repercusión en dos planos: el ahorro en el consumo de energía y el ahorro producido por la optimización del uso de los componentes.

Estos dos planos de repercusión confieren al departamento de fabricación un peso fundamental en la gestión de la energía, por encima incluso de las labores de mantenimiento. Por tanto la incidencia de la gestión energética va más allá del ahorro energético producido y genera sinergias que incrementan la productividad de forma más que proporcional al ahorro energético obtenido. Este incremento de la productividad puede expresarse según la expresión (3).

Las medidas de ahorro que produzcan sinergias en el global de proceso productivo deberán ser preferentes frente a aquellas que busquen sólo la mejora del mantenimiento. Por tanto, el consumo energético debe analizarse desde la globalidad de un proceso conformado por varios sistemas; y no como máquinas aisladas con un determinado rendimiento.

En resumen, la gestión energética en la industria de fabricación va más allá del ahorro y de un buen mantenimiento. Es una cuestión fundamental para poder generar ventaja competitiva y, consecuentemente, tiene un carácter estratégico.

6. Referencias

- [1] S. Rondán *Eficiencia Energética en la Industria. Identificación de las Claves de la Optimización Eléctrica*. III Congreso Int. de Energía y Medioambiente (2009).
- [2] N. Nagesha, P. Balachandra. *Barriers to energy efficiency in small industry clusters. Multi-criteria-based prioritization using the analytic hierarchy process*. Elsevier, 2006, Energy.
- [3] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Secretaría de Industria. *La Energía en España, 2007*. 2008.
- [4] International Energy Agency. *Energy Use in the New Millennium*. 2007.
- [5] Almedia, Anibal de. *Definition: What is a Motor System*. IEA Industrial Electric Motor Systems Workshop, 2006.
- [6] Competition and productivity in Japanese manufacturing industries. Okada, Yosuke. 19, Elsevier, 2005, J. Japanese Int. Economies, pp. 586-616.
- [7] International Energy Agency. *Energy Policies of IEA Countries. Spain 2005 Review*. 2006.

Mejora del Rendimiento del Mecanizado en Aleaciones de Aluminio de Elementos Aeronáuticos Sometidos a Corrosión

A. Gómez Parra⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/Chile s/n 11003, 956015123

⁽¹⁾alvaro.gomez@uca.es.

Resumen

En un sector industrial como el aeronáutico la elección de un Sistema de Fabricación acorde con la exigencia tecnológica y de perfecta calidad es de importancia estratégica. El Lean Manufacturing es el elegido para optimizar los procesos de fabricación, contribuyendo a la eliminación de gastos innecesarios de recursos naturales, humanos y empresariales. Uno de los problemas principales en los que actualmente se centran gran parte de los esfuerzos de la industria aeronáutica son los problemas corrosivos que afectan de manera sistemática a las partes metálicas que componen una aeronave.

A través de la optimización de los procesos de fabricación se pretende atajar de manera sustancial esta problemática.

1. Introducción

El sector aeronáutico es un sector estratégico a nivel mundial por su actividad en el desarrollo de productos de alto valor añadido y la creación de empleo de alta cualificación. Éste tiene unas características muy singulares, que le diferencian claramente de otros sectores industriales y que le confieren una dimensión marcadamente global. La industria aeronáutica suele tener un fuerte impacto económico como generador de riqueza y conocimiento, con capacidad de difusión a otros sectores económicos. Como botón de muestra se puede mencionar aplicaciones en la automoción tales como los motores ligeros de aluminio o el sistema *fly-by-wire*.

En lo que se refiere a la industria aeronáutica española, ésta es la quinta de Europa y una de las pocas capaces de realizar toda la cadena de valor de un avión completo. Como principales características destacan, la gran inversión en I+D que en ella se lleva a cabo y la búsqueda incesante de la mejora continua.

Como ya se ha indicado, los niveles tecnológicos desarrollados son uno de los más elevados dentro de la industria actual, ya que los elementos que componen una aeronave están sometidos a esfuerzos límites y grandes cambios de presiones y temperaturas en cuestión de minutos, de ahí que los requerimientos de fabricación sean de perfecta calidad.

A esto último, se le suman las dificultades a que las compañías aeronáuticas se enfrentan en el mercado actual: cambios en las demandas de los clientes, nuevos materiales, incrementos en la

variación de los productos y exigencias de máxima calidad.

La correcta elección del Sistema de Fabricación para cualquier empresa del sector, supone en la actualidad una problemática cuyo planteamiento correcto es de importancia trascendental. Entendiendo Sistema como una globalidad en la que están incluidos desde las estrategias empresariales, los recursos humanos, la seguridad laboral...etc. hasta llegar a los Procesos de Fabricación. [1]

Para empresas, el objetivo básico será al fin y al cabo obtener productos que más satisfagan a sus clientes siendo a la vez lo más competitivos posible. La implantación de Sistemas de Fabricación Avanzados como el Lean Manufacturing surge para dar respuesta a esta necesidad.

El Lean Manufacturing es una filosofía metodológica en la que se engloban una serie de principios, conceptos y técnicas diseñadas para eliminar todo aquello que no aporta valor al producto estableciendo un Sistema de Producción eficiente, justo a tiempo que permita realizar entregas a los clientes de los productos requeridos, cuando son requeridos, en la cantidad requerida, en la secuencia requerida y sin defectos. Aplicar las prácticas Lean es una forma de reducir costes, mejorar los resultados y crear valor para la empresa. La filosofía Lean permite optimizar la calidad gracias a la mejora constante de los procesos de trabajo y a la eliminación de gastos innecesarios de recursos naturales, humanos y empresariales. [2]

En el sector aeronáutico tienen lugar multitud de procesos de fabricación, entre los que se pueden

encontrar por ejemplo: laminados de fibra de carbono, tecnología superplástico, conformados de chapa, mecanizados electroquímicos, procesos de pintura, montajes de estructuras y procesos de mecanizado con arranque de material en aleaciones ligeras, figura 1. La tendencia actual en el sector aeronáutico, como ya se ha comentado antes, es conseguir bajo el amparo de la filosofía Lean optimizar los recursos para obtener el máximo rendimiento con el mínimo coste posible.

De entre todos los procesos de fabricación mencionados anteriormente se encuentra el mecanizado con arranque de material en aleaciones ligeras, este proceso en la actualidad, presenta una serie de problemas a la hora de llevarlo a cabo, lo que lo hace objetivo principal de estudio e investigación en la industria aeronáutica.

En los últimos tiempos, debido a las exigencias en materia medioambiental, estos procesos se tratan de llevar a cabo en ausencia de fluidos de corte. Sin embargo, la supresión total de estos fluidos origina condiciones muy agresivas. Esta nueva situación hace necesaria buscar combinaciones de parámetros de corte y tipos de herramientas que optimicen el mecanizado en condiciones extremas, con el propósito de obtener un nivel de calidad del producto en

concordancia con las especificaciones demandadas y con el menor coste posible. De entre los requisitos de calidad de las piezas mecanizadas, uno de los más considerados, es el relacionado con sus aspectos microgeométricos, es decir, el grado de acabado superficial obtenido.

Por otro lado no se debe perder de vista el material con el que se lleva a cabo el proceso de mecanizado. En la actualidad, la mayoría de las compañías constructoras aeronáuticas contemplan el uso de aleaciones de aluminio bien conocidas o algunas de sus variantes suficientemente estudiadas. Estas aleaciones se han venido utilizando debido a varias cuestiones. En primer lugar, su excelente relación peso /propiedades fisicoquímicas /coste. Por otro lado, cumplen sobradamente los exigentes requisitos que en cuestión de Resistencia de Materiales se exige a los Elementos Estructurales de las aeronaves.

Como contrapartida, estas aleaciones presentan problemas de corrosión localizada debido a la heterogeneidad de la microestructura de la aleación, figura 2. [3] La cual se puede ver aún más afectada por las condiciones físicas en las que el componente metálico desarrollará su trabajo, condiciones como cambios bruscos de presión y temperatura, ambientes salinos...etc [4]. Todo esto a su vez unido, a esfuerzos

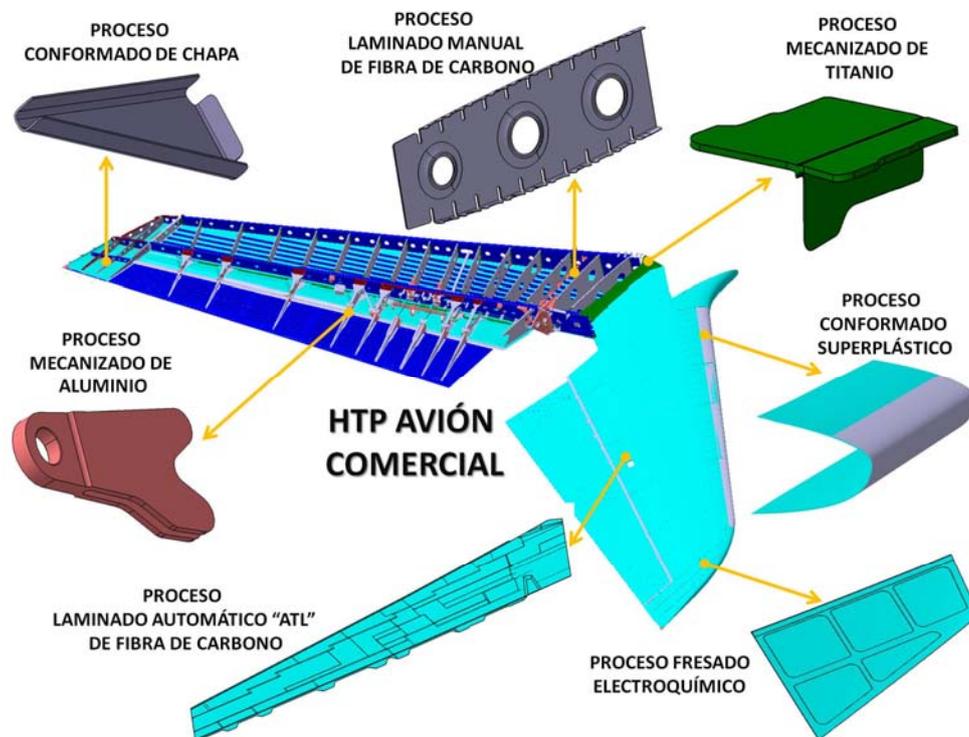


Figura 1. Procesos de Fabricación que intervienen en un componente estructural aeronáutico

mecánicos como tracciones, compresiones y ciclos de fatiga.

De tal manera que estos efectos pueden repercutir en la aparición de corrosión, la cual puede **potenciarse** en origen por el propio conjunto de los **Procesos de Mecanizado** a los que se someten los materiales antes de su puesta en servicio.

Pudiendo tener consecuencias como la Corrosión Bajo Tensión **CBT**, Tensión Tras Corrosión **TTC**, y la Corrosión en Piezas Sometidas a Fatiga. **CAFC**



Figura 2. Efectos de la corrosión en un modelo de avión Boeing 747-438.

Como solución, se plantea la posibilidad de realizar **modificaciones en los procesos de fabricación**, de manera que permitan **mejorar el rendimiento económico, medioambiental y**

en servicio de los elementos metálicos expuestos a **corrosión**.

2. Metodología Experimental

A continuación se expone en el flujograma de la figura 3, las líneas básicas de estudio que contendrá la tesis doctoral durante su desarrollo.

3. Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al Proyecto “Sostenibilidad económica, energética y medioambiental del mecanizado de materiales de interés aeronáutico” (Código del proyecto DPI2008-06771-C04-01)

4. Referencias

- [1] E. Fernández, L. Avella, M. Fernández, *Estrategia de Producción*, 2ª Edición, Mc Graw Hill, Madrid (España), 2006. ISBN: 84-481-4938-6.
- [2] J.P.Womack, D.T.Jones, *Lean Thinking*, 1ª Edición, Gestión 2000/AMAT, Madrid (España), 2003. ISBN: 84-8088-689-7
- [3] M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, *Behaviour of the alloy AA2017 in aqueous solutions of NaCl. Part I: Corrosion mechanisms*, Corros. Sci. 51 (2009) 518–524
- [4] A. Aballe, M. Bethencourt, F.J. Botana, M.J. Cano, M. Marcos, *Localized alkaline corrosion of alloy AA5083 in neutral 3.5% NaCl solutions*, Corros. Sci. 43 (9) (2001) 1657–1674.



Figura 3. Líneas que se abordaran en el desarrollo de la tesis doctoral

Metodología para la prueba de caja blanca en WS-BPEL basada en mutaciones y generación dinámica de invariantes

M. Palomo Duarte⁽¹⁾, I. Medina Buló⁽²⁾

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Escuela Superior de Ingeniería,
C/ Chile, 1 (CP 11002) – Cadiz.

⁽¹⁾956-01-54-83, manuel.palomo@uca.es. ⁽²⁾956-01-57-80, immaculada.medina@uca.es

Resumen

La generación dinámica de invariantes es una técnica de prueba de caja blanca de software utilizada con éxito en lenguajes estructurados y orientados a objetos. WS-BPEL es el lenguaje estandarizado por OASIS para la composición de servicios web. Takuan es una herramienta que hemos desarrollado en un trabajo previo y que permite generar dinámicamente invariantes de composiciones de servicios web en WS-BPEL. En este artículo presentamos una metodología basada en mutaciones de las especificaciones de la composición para usar los invariantes generados por Takuan en la prueba de caja blanca de composiciones WS-BPEL.

1. Introducción

Los Servicios Web (SW) y las arquitecturas orientadas a servicios están cambiando la forma de entender la informática a corto y medio plazo [1]. Cuando surge la necesidad de ofrecer servicios más potentes basados en otros disponibles se suelen usar lenguajes de composición de servicios (permitiendo su programación a gran escala, *programming in the large*), como el estándar OASIS WS-BPEL [2], que está adquiriendo cada vez una mayor importancia en las TIC [3].

A la hora de probar el software existen dos enfoques principales: la *prueba de caja negra* sólo considera las entradas y salidas de un programa, mientras que la *prueba de caja blanca* analiza la lógica interna de un programa. Esta última es posible de realizar al componer servicios con WS-BPEL, aunque el código de los servicios en sí está oculto por lo general al desarrollador de la composición.

La generación dinámica de invariantes [4] es una técnica que toma lo mejor de dos mundos: la prueba de software (testing) y los métodos formales. Básicamente aplica un motor de generación de invariantes basado en métodos formales a una serie de trazas obtenidas de la ejecución de un conjunto de casos de prueba sobre un determinado programa.

Takuan [5] es un sistema desarrollado en un trabajo previo y que permite generar dinámicamente invariantes de composiciones de servicios web en WS-BPEL.

El objetivo principal de este artículo es exponer una metodología para usar los invariantes generados por Takuan en la prueba de caja

blanca de composiciones WS-BPEL basándonos en la mutación de su especificación.

2. Generación Dinámica de Invariantes en WS-BPEL

La mayoría de las técnicas que hemos encontrado para prueba de caja blanca de WS-BPEL [6] no ejecutan directamente código sobre un motor, sino que crean un modelo de simulación en un entorno especializado para pruebas. Pero simular un motor WS-BPEL es algo complejo, dado que hay una gran cantidad de características nada simples que implementar (compensación, manejo de fallos, etc). Si alguno de sus detalles no se implementara de forma correcta, la composición no se probaría adecuadamente. Por ello, consideramos que es un proceso propenso a errores, dado que no se basa en la ejecución de código en un entorno real (es decir, un motor WS-BPEL que invoque a servicios reales).

Por el contrario, Takuan usa información recopilada en las trazas de una serie de ejecuciones de la composición WS-BPEL bajo un motor real para generar dinámicamente invariantes potenciales [7]. Si las ejecuciones se realizan con un conjunto de casos de prueba que ejerciten toda la lógica de la composición, las trazas incluirán sus aspectos más delicados, como determinados comportamientos de los servicios externos, compensaciones de errores, etc. Por lo tanto, permitirá generar invariantes que caractericen mejor la composición.

Conviene aclarar en este punto que en este artículo se utilizan los términos *invariante* e *invariante potencial* en el mismo sentido en que

se usa en la bibliografía de la materia [4], refiriéndose *invariante* a cualquier propiedad que es cierta en un determinado punto del programa (como un aserto, pre-condición, invariante de bucle, etc), e *invariante potencial* a cualquier propiedad que se mantiene en los distintos casos de prueba ejecutados.

Takuan usa internamente el motor Active BPEL, que soporta el estándar WS-BPEL 2.0. Este motor es bastante ligero (lo que acelera la ejecución de muchos casos de prueba), y cuenta con soporte empresarial de ActiveVOS.

Igualmente, también usa BPELUnit, una biblioteca de prueba unitaria WS-BPEL que puede usar cualquier motor que implemente WS-BPEL 2.0. Entre sus principales características está el uso de ficheros XML para describir los casos de prueba a ejecutar y la posibilidad de sustituir servicios externos con otros servicios que los simulen desarrollando el comportamiento indicado en la especificación proporcionada por el usuario. Esta opción es recomendable si existen limitaciones en el uso de servicios externos, restricciones de recursos, problemas de costes, etc. Incluso puede ser que simplemente no se desee probar el comportamiento de una composición con la respuesta que dé un servicio en el momento de su ejecución, sino con un valor predeterminado concreto que defina un escenario.

Por último, Takuan usa el generador dinámico de invariantes Daikon para generar los invariantes de la composición. Todos estos sistemas son interconectados con *scripts* y programas realizados al efecto.

Estos invariantes pueden usarse de diversas formas para mejorar una composición. Por ejemplo, un invariante inesperado puede hacernos ver un fallo en el código que de otra forma podría haber pasado desapercibido. También, a la hora de ampliar un programa, se pueden comprobar qué invariantes deben mantenerse y cuáles no entre dos versiones de él (por lo que cualquier diferencia indicaría que se ha introducido algún error en el nuevo código). Incluso se puede comparar la especificación del programa con los invariantes obtenidos para ver si esta se cumple.

Además, un invariante erróneo que se haya generado dinámicamente, puede indicar una deficiencia en el conjunto de casos de prueba usado para inferirlo y ayudar a mejorarlo. Como se observa el diagrama de la Figura 1, a partir de un conjunto de casos de prueba y una composición de entrada, se pueden analizar los invariantes generados por Takuan para mejorar la composición (si detectamos algún error en ella) o el conjunto de casos (añadiendo casos adicionales que ayuden a mejorar los invariantes). Estas mejoras se pueden

comprobar comparando los resultados originales con aquellos proporcionados por las versiones mejoradas del conjunto de casos y/o la composición.

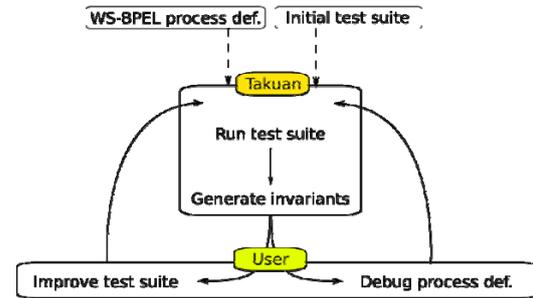


Figura 1. Esquema de uso de Takuan.

Takuan se ha usado con éxito en diversas composiciones, como el ejemplo del préstamo bancario [8] o una composición de metabúsqueda de información [9]. Tras dichas pruebas se observaron ciertas limitaciones en sus prestaciones, por lo que se desarrollaron una serie de mejoras tanto de consumo de recursos (disminuyendo el uso de CPU y memoria, lo que permite analizar composiciones más grandes) y de mejora de la salida, evitando invariantes redundantes [10].

Se ha demostrado que al proporcionar un número suficientemente grande de casos de prueba aleatorios como entrada de Takuan, los invariantes resultantes de su ejecución se estabilizan [11]. Además, también se ha confirmado que la cobertura del conjunto de casos de prueba usados en la entrada de Takuan es también un indicador de la calidad de su salida [12].

3. Metodología propuesta para usar Takuan

Un problema al que nos enfrentamos cuando queremos demostrar la validez de la generación dinámica de invariantes para hacer prueba de caja de WS-BPEL es la escasez de definiciones de procesos WS-BPEL disponibles públicamente que incluyan especificaciones que puedan compararse con los resultados de Takuan la metodología que presentamos a continuación no necesita dichas especificaciones para funcionar.

La mutación de código es una técnica usada para apoyar la prueba de software. Básicamente introduce intencionadamente fallos en un programa para comprobar si se pueden descubrir a posteriori con alguna técnica (normalmente ejecutando el código). Un ejemplo de fallo sería, por ejemplo, cambiar una sentencia `if (x<1)` por `if (x>1)`. De este modo se demuestra que la técnica usada puede detectar errores en el programa.

Nuestra propuesta consiste en mutar el código WS-BPEL de la composición a probar para comprobar si los invariantes obtenidos en esas composiciones mutadas son diferentes que los obtenidos en la original con el mismo conjunto de casos de prueba.

Para WS-BPEL está disponible bajo licencia libre el generador de mutantes GAmEra [13], que implementa los operadores de mutación para WS-BPEL descritos en [14]. Estos son los únicos disponibles actualmente que han sido diseñados expresamente para modelar los fallos que puede cometer un desarrollador al programar WS-BPEL (teniendo en cuenta aspectos como que la programación en WS-BPEL se realiza normalmente con un asistente gráfico y no un editor de código fuente). Además, estos operadores evitan expresamente algunos mutantes equivalentes que se podrían dar en WS-BPEL (los programas mutantes equivalente son programas que aunque distintos sintácticamente al original, tienen el mismo comportamiento, por lo que no aportan a la prueba y conviene evitarlos [15]).

Dada una composición WS-BPEL, nuestra metodología propone realizar los siguientes pasos en el orden indicado:

- Se genera un conjunto de casos de prueba aleatorios lo suficientemente grande como para que los invariantes puedan considerarse fiables.
- Se ejecuta Takuan proporcionando en su entrada la composición WS-BPEL a probar y el conjunto de casos de prueba generados. Y se almacenan los invariantes obtenidos a su salida.
- Se generan todos los mutantes posibles de la composición con GAmEra.
- Se ejecuta en Takuan cada mutante bajo el conjunto de casos de prueba, almacenando la salida en cada caso.
- Se comparan los resultados de la composición inicial y del resto de mutantes.

Para comprobar nuestra metodología se analizarán los resultados de la comparación entre los invariantes de la composición original y los de las mutadas. Este análisis incluirá diferencias entre los conjuntos de invariantes, tipos de invariantes (atendiendo a la clasificación que Daikon realiza) y el punto del programa en que se cumplen. Pensamos que las diferencias que se observen ayudarán a demostrar que usando Takuan se pueden descubrir los errores producidos en la mutación.

4. Conclusiones y trabajo futuro

Hoy en día parece claro que el futuro de la informática pasa ineludiblemente por los SW. La necesidad de componerlos para proporcionar servicios más complejos con independencia de las plataformas usadas ha sido satisfecha con el estándar WS-BPEL 2.0 de OASIS. Pero es necesario proporcionar técnicas que permitan probar dichas composiciones.

En este artículo hemos expuesto una metodología para aplicar los invariantes generados por Takuan a la prueba de caja blanca de composiciones WS-BPEL apoyándose en la mutación de su implementación con el generador de mutantes GAmEra.

Esta metodología propone la introducción de errores en la composición a probar mediante mutaciones del código fuente de su especificación. Después, ejecutando sobre ella un conjunto de casos de prueba que previamente habían sido ejecutados en la composición original, los invariantes obtenidos de ellos son comparados. Creemos que las diferencias observadas ayudarán a demostrar que Takuan es una herramienta válida para la prueba de caja blanca de WS-BPEL.

Nuestro siguiente trabajo será aplicar dicha metodología a varias composiciones y analizar sus resultados.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Programa Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia y fondos FEDER mediante el proyecto SOAQSIm (TIN2007-67843-C06-04).

6. Referencias

- [1] F. Curbera, R. Khalaf, N. Mukhi, S. Tai, and S. Weerawarana, *The next step in Web Services*, Communications of the ACM, 46(10):29–34, 2003.
- [2] Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS), *WS-BPEL 2.0 Standard*, <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>, 2007.
- [3] J. J. Domínguez Jiménez, A. Estero Botaro, I. Medina Buló, M. Palomo Duarte y F. Palomo Lozano, *El reto de los servicios web para el software libre*, Proceedings of the FLOSS International Conference 2007 (FLOSSIC 2007), Jerez de la Frontera.
- [4] M. D. Ernst, J. Cockrell, W. G. Griswold, y D. Notkin, *Dynamically discovering likely program invariants to support program evolution*, IEEE Transactions on Software Engineering, 27(2):99–123, 2001.

- [5] Grupo SPI&FM, *web oficial de Takuan*, <http://neptuno.uca.es/takuan>, 2009.
- [6] A. Bucchiarone, H. Melgratti y F. Severoni, *Testing service composition*, Proceedings of the 8th Argentine Symposium on Software Engineering (ASSE 2007), Mar del Plata.
- [7] M. Palomo Duarte, A. García Domínguez, A. Álvarez Ayllón e Inmaculada Medina Bulo, Takuan, *Generación dinámica de invariantes en composiciones de servicios web con WS-BPEL*, Actas de las XIV Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD 2009), San Sebastián.
- [8] M. Palomo Duarte, A. García Domínguez e I. Medina Bulo, *Takuan: A dynamic invariant generation system for WS-BPEL compositions*, Proceedings of the 6th IEEE European Conference on Web Services (ECOWS 2008), Dublín.
- [9] M. Palomo Duarte, A. García Domínguez, I. Medina Bulo, *Improving Takuan to analyze a meta-search engine WS-BPEL composition*, Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE'08), Jhongli.
- [10] M. Palomo Duarte, A. García Domínguez, I. Medina-Bulo, *Enhancing WS-BPEL dynamic invariant generation using XML Schema and XPath Information*, Proceedings of the 9th International Conference on Web Engineering (ICWE'09), San Sebastián.
- [11] A. Álvarez Ayllón, A. García Domínguez, M. Palomo Duarte e I. Medina Bulo, *Los casos de prueba en la generación dinámica de invariantes en composiciones de servicios web con WS-BPEL*, Actas de las V Jornadas Científico-Técnicas en Servicios Web y SOA, Madrid, 2009.
- [12] M. Palomo Duarte, A. Álvarez Ayllón e I. Medina-Bulo, *La cobertura de los casos de prueba en la generación dinámica de invariantes en composiciones WS-BPEL*, Actas de Talleres de Ingeniería del Software y Bases de Datos, San Sebastián, 2009.
- [13] Juan José Domínguez-Jiménez, Antonia Estero-Botaro, Antonio García-Domínguez, Inmaculada Medina-Bulo, *GAmara: An Automatic Mutant Generation System for WS-BPEL*, Proceedings of the 7th IEEE European Conference on Web Services (ECOWS 2009), Eindhoven.
- [14] A. Estero Botaro, F. Palomo Lozano e I. Medina Bulo, *Operadores de mutación para WS-BPEL 2.0*, Actas de los Talleres de las Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos, 2008.
- [15] M.R. Woodward, *Mutation Testing –its Origin and Evolution*. Information and Software Technology, vol. 35(3), pp. 163-169 (1993)

Modelo de Gestión de la Calidad para el Tratamiento de Material No Conforme detectado en procesos Industriales

J.M. Cantillo Sánchez⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial.
Dirección: c/ Chiclana, nº28, 2ªA. 11140 Conil de la Frontera. Cádiz.
Teléfono de contacto: 607 305 206 / 628 631 092. e-mail: Jose.Cantillo@casa.eads.net.

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial.
C/ Chile, 1. 11003 Cádiz

Resumen

Un Sistema de Gestión de la Calidad y en concreto, el proceso de tratamiento de material no conforme, debe cumplir con los requisitos de la normativa aplicable pero, ésta en la gran mayoría de los casos establece el “Qué” hay que cumplir pero no de forma tan clara el “Cómo” hay que proceder para cumplirlos. Este hecho, en cierta medida es lógico, dada la flexibilidad inherente a la propia definición de la normativa pero, es claramente, un obstáculo importante que las organizaciones tienen que cubrir para tener un sistema que cumpla con los requisitos y, a la vez, sea eficiente. Como antecedente hay que destacar la realización de un Trabajo de Investigación [1] en el que a través de una revisión bibliográfica y otros datos significativos recogidos en áreas organizativas muestreadas se ha obtenido el estado del arte del proceso de tratamiento de material no conforme. Con toda esta información se ha establecido un hito de partida para la realización de un Tesis Doctoral.

1. Introducción

La Gestión del tratamiento de Material no Conforme en cualquier industria es un aspecto Fundamental dentro de su Sistema de Gestión de la Calidad (SGC), dado que, el Sistema debe proporcionar el aseguramiento del cumplimiento de los requisitos de diseño y contractuales de todo lo producido, además del establecimiento de un sistema de mejora continua en la propia organización.

En el trabajo de investigación [1] se han tratado una serie de organizaciones / empresas (PYMES), suministradoras de primer nivel y certificadas ante entidades acreditadas, teniendo en cuenta los diferentes sectores industriales de la Bahía de Cádiz. Atendiendo a la ubicación

geográfica donde se desarrolla el trabajo, se han contemplado para el análisis de situación, los dos sectores industriales predominantes en la zona: sector aeroespacial y el sector naval.

Se ha realizado una revisión tanto a los requisitos globales como los específicos aplicables al tratamiento del material no conforme y enfocado a los dos sectores industriales contemplados para garantizar el cumplimiento de toda la normativa tanto civil como militar.

Se ha considerado necesario tratar a la organización teniendo en cuenta los tres bloques bien diferenciados del proceso productivo, es decir, proveedor, proceso interno (de la organización) y cliente (Ver figura 1).

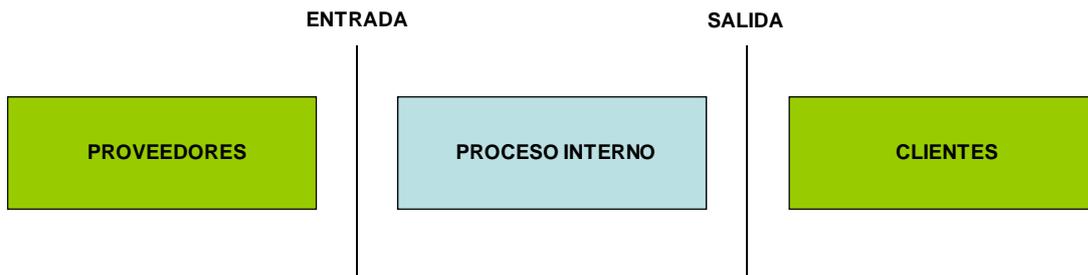


Figura 1. Bloques del proceso productivo

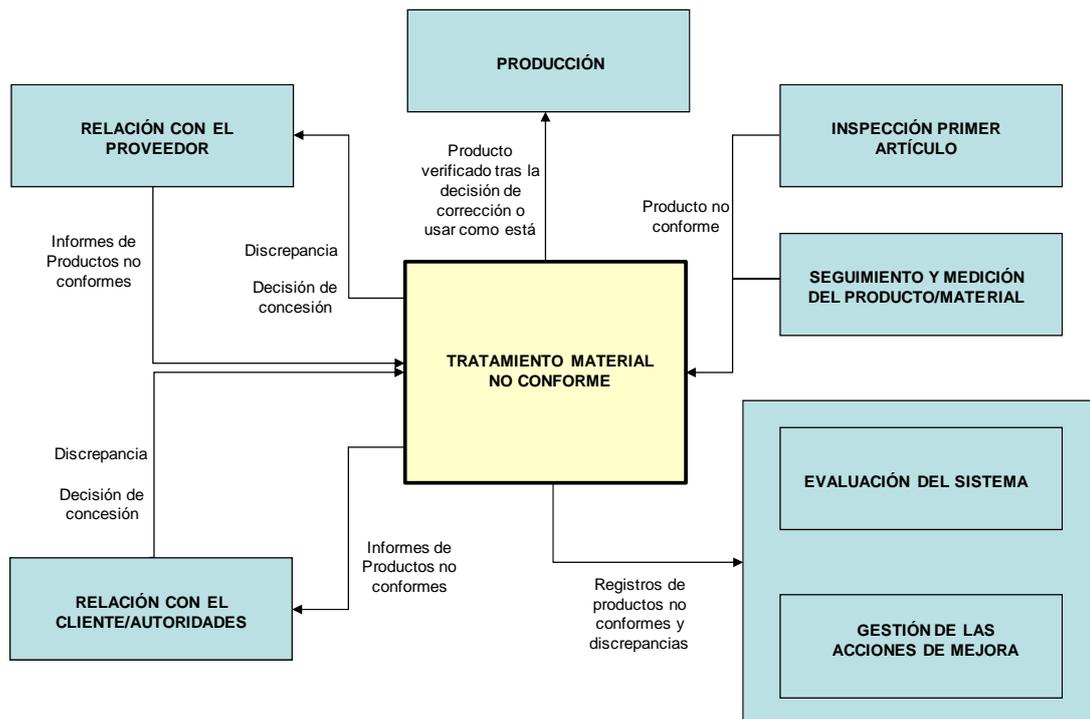


Figura 2. Interrelación de Procesos

Contemplando dichos bloques y sus interfaces se entiende que se trata el proceso de tratamiento de material no conforme en todo su ámbito o aplicación. Adicionalmente y, para una mayor comprensión, se ha tratado dicho proceso en cuanto a la interrelación con el resto de procesos aplicables (Ver Figura 2) y que forman parte del propio SGC de la organización.

2. Metodología Experimental

Teniendo definidos los requisitos tanto globales como específicos según el sector, los tres bloques organizativos y la interrelación del proceso de tratamiento de material no conforme con el resto, se ha procedido a estudiar de forma específica cuáles serían los factores claves dentro del proceso de Tratamiento de Material No Conforme, considerando dichos bloques planteados y la operatividad real que actualmente desempeñan las organizaciones. Los criterios que se han definido para la detección y el estudio de dichos factores claves del proceso han sido aquellos que pudieran derivar en desviaciones inherentes a productos entregados a cliente según los parámetros de calidad, costes y plazo.

3. Resultados y Discusión

Como resultados del trabajo investigación se han establecido los factores claves. Éstos representan la realidad actual de las pymes, siendo éstos, los descritos a continuación:

Teniendo en cuenta la estructura operativa
Entrada (Proveedores).

Catálogo de Proveedores Aprobados (CPA).
 Delegación de Calidad.
 Pautas de Recepción.
 Inspección técnica atendiendo al histórico de NC's.
 Gestión del ASRM.
 Gestión de ID's con los proveedores.

Proceso Interno.

Detección y descripción de las NC's.
 Disposición de las No Conformidades.
 Creación de órdenes de producción para ejecución de disposiciones.
 Delegación de Calidad en el proceso interno.
 Operaciones de Inspección y Verificación (OIV's).
 Gestión del ASRM.

Clientes.

Recepción realizada por el cliente.
 Requerimientos a la organización exigidos por el cliente.

Teniendo en cuenta otras interrelaciones, ya que, poseen influencia en el proceso:

Seguimiento y medición del material no conforme. Definición de indicadores.
 Establecimiento de objetivos, indicadores y los sistemas de información.

Procesos de desarrollo (PaP, IPA) / Procesos de serie. Grupos de Acciones Correctivas y Preventivas (GACC).

Roles, responsabilidades y competencias. Perfiles profesionales, planes de formación y de entrenamiento.

Como resumen, hay que tener en cuenta que prácticamente en su totalidad todos estos factores claves son susceptibles de mejora.

Algunas de las causas por las cuales son mejorables pueden ser varias, alguna desde un punto de vista generalista se podrían destacar en las siguientes:

Falta de conocimiento al nivel de detalle requerido. La normativa vigente establece los requisitos a cumplir, es decir, define claramente el “qué”, aunque, hay que tener en cuenta que toda normativa parte de una consideración general. Esto implica la ventaja de la flexibilidad para aplicarla pero el inconveniente de no saber el “cómo” implantarla.

Sistemas implantados en la organización sin un correcto proceso de desarrollo. Esto conlleva una generación de problemas futuros.

Creencia. La implantación de todo sistema de gestión de la calidad conlleva un esfuerzo por parte de la organización y, esto implica, un cambio cultural, de filosofía, de recursos, etc. y,

a todos los niveles de la organización (incluida la dirección).

Malas prácticas. Se tiene el conocimiento pero no se aplica. El hecho de falta de control en el proceso implica esta posibilidad sin que a priori pueda ser detectada. El desarrollo de los Sistemas de gestión de competencias es una herramienta muy válida.

Estas causas generales se traducen a otra serie de causas más específicas que se tienen que tener en cuenta para ser minimizadas y, en consecuencia, establecer el nuevo modelo con todas las mejoras definidas.

Con lo cual, el objetivo de la Tesis es la creación de un modelo de gestión del tratamiento de Material No Conforme que, por un lado, cumpla con los requisitos (Generales y Específicos) asociados a la normativa y documentación aplicable a los sectores industriales tratados y, por otro lado, que establezca soluciones y alternativas de detalle a los factores claves susceptibles de mejora, y así, aumentar del grado de eficiencia de los mismos, para que realmente puedan aportar un mayor valor añadido al propio modelo y, en definitiva, a las pymes.

4. Referencias

[1] Cantillo Sánchez, José María. *Trabajo de Investigación del Diploma de Estudios Avanzados del Programa de Doctorado en Ingeniería de Fabricación*. Febrero de 2009

Modelo Holónico de Sistemas de Calidad Aplicación a Empresa Extendida

J. R. Lama Ruiz⁽¹⁾, M. Sánchez Carrilero⁽²⁾, F. Aguayo González⁽³⁾

^(1,3) Ingeniería del Diseño, c/Virgen de África n.7, 41010, Sevilla, 954552827,
⁽¹⁾ jrlama@us.es, ⁽³⁾ faguayo@us.es

⁽²⁾ Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/ Chile n.1, 11003, Cádiz, 956005100,
manuel.carrilero@uca.es

Resumen

En el presente trabajo se describen los objetivos fundamentales de la investigación que se viene desarrollando en relación a la tesis modelo holónico de sistemas de calidad y su aplicación a empresa extendida, así como sus principales antecedentes y estado del arte. También se describe de forma sucinta la metodología que se sigue y las principales conclusiones.

1. Introducción

Derivado de las necesidades y oportunidades de los nuevos modos de operar por las empresas en sus ámbitos comerciales, financieros, productivos, etc. y de los objetivos de mayor integración y eficiencia, ha devenido un creciente interés en lo que se refiere a la investigación sobre:

- Modelos de sistemas de fabricación que permitan operar virtualmente con las TICs, confiriéndoles una mayor agilidad, flexibilidad y resiliencia en su ciclo de vida.
- Arquitecturas de referencia de empresas extendidas que soporten su desarrollo evolutivo desde la perspectiva de la ingeniería del ciclo de vida, dando lugar a empresas adaptativas.
- Modos de gestión y explotación, que permitan a la empresa extendida y virtual el modo de operación descentralizado y sostenible con la cultura del contexto en el que opera.

En los ámbitos de investigación precedentes se plantea la necesidad de dar soporte a las nuevas arquitecturas de operación virtual, bajo los modelos de empresa extendida y distribuida, integrando los estándares internacionales de calidad, medioambiente, seguridad y salud, con el resto de los sistemas de gestión de procesos y datos de productos.

En el presente trabajo se exponen las líneas fundamentales de la Tesis Doctoral que se encuadra dentro de una de las líneas de investigación desarrollada por el grupo de investigación de Tecnología de Materiales de la Universidad de Cádiz y que ha dado como fruto la Tesis Doctoral denominada "Diseño y Fabricación de productos en Sistemas

Holónicos" [1], con el propósito general de formalizar y validar un modelo holónico aplicado a los sistemas de calidad de las empresas extendidas, planteándose los siguientes objetivos.

2. Empresa Extendida y Paradigma Holónico

La empresa extendida [2] es aquella que amplía su actividad más allá del ámbito geográfico local en el que habitualmente opera, en lo que se refiere a los mercados, proveedores, socios, clientes, etc. Esta nueva configuración requiere la integración de las distintas cadenas de valor de los agentes que intervienen en el ciclo de vida del producto, proceso o servicio, como son: clientes, proveedores, los distintos subsistemas o departamentos de la organización y otras compañías que cooperan en un objetivo de negocio común.

Todo lo anterior plantea problemas de distribución de tareas, ingenierías colaborativas, coordinación de recursos, intercambio de información, compatibilidades de datos, establecimiento de métodos y herramientas integradas y gestión del tiempo; que son resueltas con técnicas de paralelización, integración y estandarización [3].

La empresa extendida requiere una plataforma tecnológica y de comunicaciones que permita la integración, coordinación y orientación a objetivos de todas las acciones incluidas en sus ciclos de diseño y desarrollo de producto/servicio.

Una primera aproximación a las estructuras de las empresas extendidas las identifican como sistemas formados por subsistemas deslocalizados físicamente, con funcionamiento autónomo, cooperativo, autorregulado y

orientadas a los objetivos estratégicos que permiten realizar productos/servicios de gran complejidad.

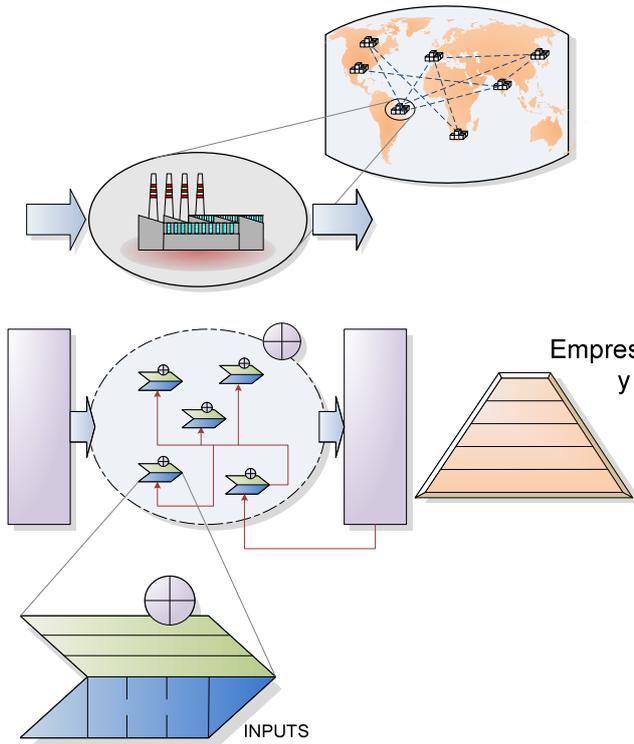


Figura 1. Elementos estructuradores del sistema de calidad empresarial en empresas extendidas.

3. Modelo Holónico de Sistemas de Calidad en Empresa Extendida

Un enfoque holónico que incorpore los procesos contemplados por EFQM nos permite abordar el desarrollo de un modelo holónico de excelencia empresarial.

La aplicación del modelo holónico se podría conceptualizar desde la teoría de la variedad de Ashby [4] como un amplificador de variedad que de soporte e integre los nuevos requisitos en el despliegue de la Calidad Total Distribuida.

Los aspectos del sistema de calidad empresarial bajo una concepción holónica, que han sido objeto de distintos trabajos, quedan referidos a algunos de los elementos estructuradores de dicho sistema, figura 2.

3.1. Concepción de la norma ISO 9000 bajo principios holónicos

El trabajo de Karapetrovic y Willborn [5], aunque desarrolla una aplicación alejada del ámbito de la fabricación, permite ser uno de los pocos trabajos que se han realizado de forma específica en calidad holónica. En el mismo se propone una aproximación holónica a la implantación de un sistema de calidad en el ámbito universitario en base al estándar ISO

9000. A pesar de referirse de forma explícita al modelo holónico y a justificar su uso en base a cualidades que claramente aporta la concepción en base a este paradigma, tales como la rapidez de cambio en los requisitos académicos y formativos, los entornos de enseñanza virtuales y distribuidos, la globalización e integración de la oferta universitaria a nivel mundial, no emplea todas las características propias de los holones como se definieron por el consorcio HMS, desaprovechando oportunidades de mejora en la concepción del modelo holónico. Concretamente, los atributos holónicos que utiliza es la orientación a objetivos de forma distribuida de cada holón que forma parte de la holarquía.

3.2. Conceptualización de la empresa como un sistema de procesos de negocio holónicos

La conceptualización de la empresa como un sistema de procesos de negocio holónicos posibilita la aproximación de su sistema de calidad como holarquía de procesos de negocio [6]. En los trabajos desarrollados por el Grupo de Gestión de operaciones e información de la Escuela de negocios de Aston (Reino Unido) [7] se propone la metodología PROH para el modelado de procesos de negocio bajo el paradigma holónico, y por supuesto los procesos contemplados en la aplicación de la norma ISO9000:2005 [8].

3.3. Formación de holarquías de los procesos del sistema de gestión integrada

La formación de holarquías de los procesos del sistema de gestión integrada, como son las holarquías de producción, seguridad y salud medioambiental y calidad [5,9].

3.4. Control de calidad on-line de los indicadores de calidad de plantas y sistemas holónicos

El control de calidad on-line de los indicadores de calidad de los holones y holarquías de procesos de plantas y sistemas holónicos [10] y la mejora continua de los holones de procesos de calidad puede inspirarse en el ciclo integral de aprendizaje del holón [9,11]. También se han propuesto mecanismos de automatización basados en el control estadístico de la calidad en el trabajo de Amen y Goch [12].

3.5. Extensión de los sistemas de calidad holónicos a las empresas distribuidas, extendidas y virtuales

Otra aproximación realizada es la extensión de los sistemas de calidad holónicos a las empresas distribuidas, extendidas y virtuales [13]. En el trabajo de Chang y Visser [14] se propone un

Proceso genérico autónomo y cooperativo

marco para la implantación de un sistema de control de la calidad distribuida, basado en el uso de las nuevas tecnologías de la información aplicadas a la calidad desde el diseño de productos, diseño de procesos y aseguramiento de la calidad. La implementación de este sistema con inspiración holónica, introduciendo la holarquía como base de la estructura de la calidad y la tecnología MAS para su implementación. En cuanto a la implementación de sistemas de calidad distribuidos, Zesar et al. [15] utiliza herramientas groupware para su aplicación en empresas de software [16,17].

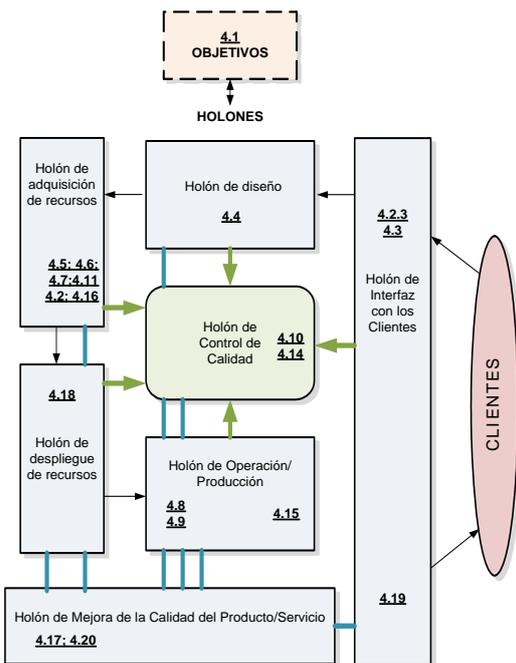


Figura 2. Sistema de Calidad Holónico ISO9001 e ISO9004-2.

4. Vista Informacional del Modelo: Agentes Inteligentes y Estructura de la Información

En el modelo de implementación basado en la arquitectura GERAM descrito en el trabajo [1] se propone el abordaje desde las vistas funcional, organizacional, de recursos y de información. Para la vista informacional, se postula una implementación basada en redes de agentes inteligentes que den soporte a las cualidades básicas del modelo holónico:

- Cooperación.
- Autonomía.
- Identidad.
- Orientación a un fin común.

Algunos de los objetivos que se persiguen mediante la implementación del sistema multiagente son:

- a) Maximizar la integración del sistema de gestión de calidad en entornos de empresas distribuidas.

- b) Posibilidad de crecimiento y auto-replicación top-down y bottom-up, que facilite el crecimiento de los sistemas de gestión de calidad en los distintos niveles de la empresa virtual y distribuida.
- c) Aumentar la eficiencia del sistema de gestión de calidad aumentando el rendimiento y disminuyendo su tiempo de respuesta y sus costes.
- d) Garantizar la coherencia inter-empresa e intra-empresa que fomente la confianza en los nuevos modelos de empresa.

Los sistemas de información deben dar soporte a los documentos de los sistemas de aseguramiento y gestión de la calidad en las empresas distribuidas y extendidas.

El uso de los modelos de datos basados en la norma ISO 10303 [18] es esencial para el aseguramiento de la calidad en empresas distribuidas. Mediante las guías que establece la norma ISO 9000 [8] para la gestión de la documentación, se propone su mapeado usando un Protocolo de Aplicación específico de STEP.

5. Metodología y planificación

Para contrastar las hipótesis planteadas se seguirá la siguiente metodología:

1. Definición del marco teórico:
 - Búsqueda del estado del arte en las bases de datos, revistas de impacto, etc.
 - Búsqueda de bibliografía referente a los temas tratados.
 - Búsqueda en la web de casos de estudio, que se hayan implementado o desarrollados en experiencias anteriores.
2. Definir el marco metodológico para el modelado:
 - Establecimiento de un lenguaje de modelado específico basado en Simulación de Sistemas Dinámicos.
 - Especificación, desarrollo e implementación de herramientas informáticas para el modelado de Sistemas de Gestión de Calidad de Empresas Extendidas bajo el Paradigma Holónico.
3. Definición de la métrica para la medida del grado de implementación del modelo propuesto y su comparación con el actual. Se hará bajo los siguientes criterios: excelencia, flexibilidad, fiabilidad, complejidad e integración.
4. Realización de la aplicación:
 - Caracterización de la empresa extendida.
 - Definición de las etapas para la implementación de la aplicación.

5. Verificación de las mejoras en la Empresa Extendida. Se comprobará utilizando la herramienta diseñada en 3, a partir de la implementación de un prototipo mediante Agentes Inteligentes.

4. Conclusiones

De la investigación realizada se desprenden las siguientes conclusiones:

- a) Las arquitecturas de empresas extendidas, distribuidas y virtuales, demandan un modelo de gestión distribuida de la calidad, que provea a las empresas extendidas de sistemas de garantía de la calidad distribuida suficientemente robustos.
- b) La tecnología de la información para la implementación del prototipos holónicos del sistema de gestión de la calidad distribuida, puede ser soportada por agentes inteligentes distribuidos.
- c) El modelo de datos de producto y de procesos requerido para el intercambio de información por el sistema de gestión de la calidad distribuida, nos ha conducido a postular como modelo para soportarlo la norma ISO 10303 (STEP).
- d) La formulación de modelos basados en dinámica de sistemas permiten predecir los resultados del sistema de garantía de calidad y su sensibilidad ante la variación de determinados parámetros operacionales e indicadores de los procesos.

6. Referencias

- [1] F. Aguayo, *Diseño y Fabricación de productos en Sistemas Holónicos*, Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 2003.
- [2] A.A. Pereira, et. all. *Managing distributed business processes in the virtual enterprise*. Journal of Intelligent Manufacturing 12, 185-197, (2001).
- [3] P. Bernus, L Nemes, *Organisational design: Dynamically creating and sustaining integrated virtual enterprises*, Draft. to appear in Proc IFAC99 World Congress, Beijing, Documento Internet, Mayo 2000, URL: <http://www.cit.gu.edu.au/~bernus/>
- [4] W.R. Ashby, *An Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall, London, 1956.
- [5] S. Karapetrovic y W. Willborn. *Holonic model for a quality system in academia*, The International Journal of Quality & Reliability Management. 16 (1999) 457.
- [6] M. Fletcher y R.W. Brennan. *Designing holonic manufacturing systems using the IEC 61499 (function block) architecture*, IEICE Trans.Inf.Syst. E84-D (2001) 1398-1401.
- [7] B. Clegg, *Business process orientated holonic (PrOH) modeling*, Business Process Management Journal. 12 (2006) 410.
- [8] UNE-EN-ISO 9000:2005. *Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario*. (ISO 9000:2005). AEN/CTN 66 - Gestión de la calidad y evaluación de la conformidad. AENOR.
- [9] M.G. Edwards. *The integral holon: A holonomic approach to organisational change and transformation*, Journal of Organizational Change Management. 18 (2005) 269.
- [10] F. Cheng, et all., *The development of Holonic information coordination systems with security considerations and error-recovery capabilities*, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2 (2001) 1832-1838.
- [11] I. Lyall y A. Zakeri. *Holons in knowledge-based manufacturing*, Manufacturing Engineer. 81 (2002) 159-161.
- [12] C. Ament y G. Goch. *A process oriented approach to automated quality control*, CIRP Ann.Manuf.Technol. 50 (2001) 251-254.
- [13] T. Suesut, et all., *Multi level contract net protocol based on holonic manufacturing system implement to industrial networks*, IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, (2004) 253-258.
- [14] S.I. Chang, J.J. Visser. *A framework of distributed quality control*, Computers & industrial engineering, 35 (1998) 181-184.
- [15] K.D. Zesar, et all., *Performance and quality aspects of virtual software enterprises*, Euromicro Conference, 1998. Proceedings, 24th. 2 (1998) 824-829 vol.2.
- [16] D. Kotak, et all., *Agent-based holonic design and operations environment for distributed manufacturing*, Computers in Industry, 52 (2003) 95-108.
- [17] M. Fleetwood, et all., *Holonic system architecture for scalable infrastructures*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2 (2003) 1469-1474.
- [18] TC184/SC4 Industrial Data. *ISO 10303. STEP: Product Data Representation and Exchange*. URL: [http://www.tc184-sc4.org/SC4_Open/SC4%20Legacy%20Products%20\(2001-08\)/STEP_\(10303\)](http://www.tc184-sc4.org/SC4_Open/SC4%20Legacy%20Products%20(2001-08)/STEP_(10303))

Primeros Avances en una Metodología Orientada a Modelos para los Sistemas de Información de Empresas de Fabricación Distribuida

A. García Domínguez⁽¹⁾, I. Medina Buló⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería. C/Chile 1, 11002, Cádiz.

⁽²⁾Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería. C/Chile 1, 11002, Cádiz.

Resumen

Para mantenerse competitivas, las empresas de fabricación necesitan aumentar su flexibilidad y reducir costes, para lo que han de integrar a entes externos dentro de su tejido. El uso de una arquitectura orientada a servicios para estructurar sus sistemas de información puede facilitar esta tarea. Han surgido diversas metodologías dedicadas a estas arquitecturas, pero ninguna cubre sus pruebas. Este artículo presenta los primeros avances en la definición de una metodología que cubra estas carencias, y se ofrecen algunos resultados preliminares. La metodología refina una serie de modelos, cada vez más cercanos al código que implementará el sistema.

1. Introducción

Hoy en día, las empresas se hallan bajo la necesidad de competir en un mercado en el que los ciclos de vida de los productos son cada vez más cortos y se exigen mayores niveles de flexibilidad y calidad a menor coste. Para ello, necesitan ser capaces de reorientar y mejorar continuamente sus procesos de negocio en función de la situación y de forma rentable. Sin embargo, las plataformas centralizadas normalmente usadas en las empresas de hoy en día no pueden cambiarse tan rápidamente como las situaciones lo requerirían, y finalmente son éstas las que definen las prácticas a seguir, más que la propia situación del mercado. Se necesita, por lo tanto, un enfoque distinto para estructurar los sistemas de información en la así llamada Siguierte Generación de Sistemas de Fabricación (SGSF).

Actualmente, se admite a nivel conceptual la necesidad de distribuir las actividades a lo largo de varios sistemas de información especializados y de posteriormente integrarlas en lo que se conoce como una empresa extendida [1]. Entre los protomodelos de empresa distribuida más conocidos, se encuentran las organizaciones holónicas, llamadas así por constituirse de una serie de actores semiautónomos que se interrelacionan entre sí a varios niveles, conocidos como holones [2].

Para plasmar este marco conceptual, afortunadamente, se ha popularizado en los últimos años una forma de estructurar los sistemas de información que se ajusta bien al

enfoque holónico. Se trata de las Arquitecturas Orientadas a Servicios o “*Service-Oriented Architectures*” (SOA). La idea central detrás de ellas es organizar los sistemas de información no como sistemas integrados unidad a unidad de negocio o proyecto a proyecto, como se ha hecho comúnmente, sino como servicios individuales que pueden ser reutilizados a lo largo de la organización, o incluso por otras organizaciones con las que se tiene relación.

Posteriormente, estos servicios individuales pueden ser integrados en servicios de nivel superior con su propio valor añadido, modelando procesos de negocio completos en vez de operaciones individuales. La información deja de concentrarse en “silos” de departamentos concretos y pasa a estar disponible a toda la organización.

Este enfoque ofrece grandes ventajas, pero no deja de tener sus propias dificultades. Implantar una SOA es complejo, ya que afecta a toda la organización, y necesita tanto una buena visión global como una correcta implementación.

Otro problema es el hecho de que el mayor grado de integración y la mayor visibilidad de los servicios de la organización implican también una mayor dependencia en su correcto funcionamiento, y un mayor grado de impacto en caso de fallo. Esto se acentúa en el caso de SOA, ya que integrar servicios externos a la organización es central a dicho enfoque.

2. Propuesta

Bajo esta situación, en este trabajo se propone la definición de una metodología para la implantación de arquitecturas orientadas a servicios para los sistemas de información de empresas de fabricación distribuida. Esta metodología debería tener las siguientes características:

- g) Poder responder a las verdaderas necesidades de la organización, por lo que tendrá que apoyarse en una descripción de la organización y su entorno actual de negocio.
- h) Ser lo suficientemente flexible como para ser utilizada en organizaciones de menor tamaño, con menos recursos para realizar un modelado extensivo.
- i) Poder modelar las pruebas sobre la funcionalidad y otras propiedades deseadas del sistema, más que únicamente su funcionalidad.

caso práctico inspirado en una importante empresa del sector tabaquero. En esta sección se describen los progresos realizados en la definición de dicha metodología, dejándose los aspectos técnicos para una posterior sección.

Desde el comienzo, se decidió basarse en una metodología existente y extenderla, en vez de partir de cero. En particular, se compararon tres metodologías:

- Stojanović [3], que extiende su metodología de desarrollo basado en componentes para tratar aspectos de SOA.
- La metodología SOMA [4] de IBM, que añade los aspectos necesarios al *Rational Unified Process* (RUP) para tratar aspectos de SOA.
- La metodología SOD-M [5] del grupo Kybele de la Universidad Rey Juan Carlos, creada desde cero alrededor del concepto de servicio, y que integra el enfoque de arquitectura dirigida por

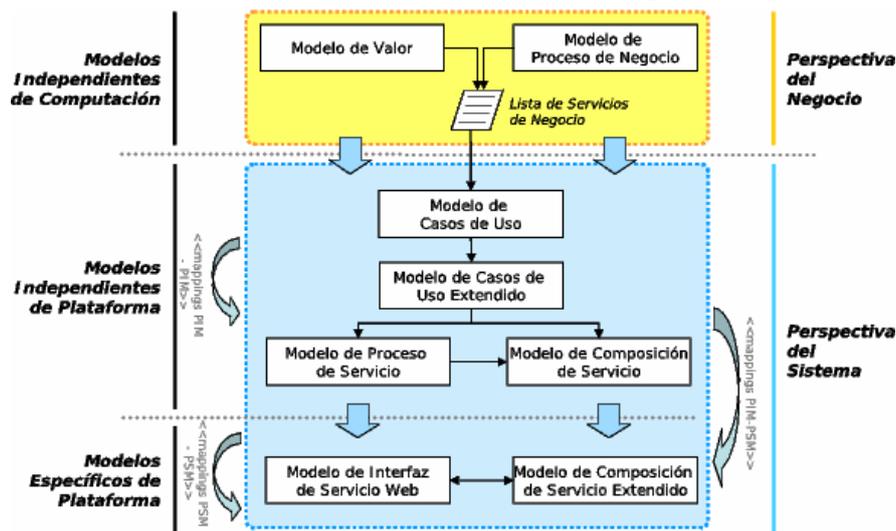


Figura 1. Esquema de la metodología SOD-M

- j) Ser automatizable, incluyendo herramientas que asistan al usuario a comprobar la consistencia de sus descripciones, conseguir el código del sistema y realizar pruebas sobre él.
- k) Apoyarse sobre tecnologías fácilmente disponibles y extensibles.

modelos propuesto por el Object Management Group [6].

Esta metodología se validará sobre casos prácticos basados en empresas de diversos sectores, como el alimentario o el aeronáutico.

3. Estado Actual de la Metodología

Durante el Trabajo Fin del Máster en Ingeniería de Fabricación se ha realizado un estudio de viabilidad de los objetivos anteriores, apoyándose en metodologías existentes y en un

De entre las tres metodologías se ha escogido SOD-M, por su potencial de automatización frente a la de Stojanović y por su menor coste de aplicación frente a SOMA. Puede verse un esquema del proceso en la figura 1. Se trata de una metodología dirigida por modelos, que consiste en la definición de una serie de modelos cada vez más detallados, primero del negocio (nivel de los modelos independientes de computación o CIM), luego del sistema a nivel abstracto (modelos independientes de plataforma o PIM) y finalmente del sistema concreto, considerando las tecnologías usadas (modelos específicos de plataforma o PSM).

Durante el análisis de SOD-M se identificó una importante carencia en dicha metodología: no asistía en las pruebas sobre la SOA finalmente implementada. Sin embargo, para que una SOA sea efectiva, debe minimizarse el riesgo que puede suponer la integración de un servicio de otra parte de la organización o incluso de una organización externa, y esto incluye la definición y ejecución metódica de un plan de pruebas sobre el sistema. Por esta razón, se han propuesto [7,8] varias extensiones sobre SOD-M para cubrir dicha carencia:

- Modelar cada una de las actividades del sistema con el tiempo límite de respuesta ante una determinada carga.
- Definir la funcionalidad esperada de cada parte del sistema de forma abstracta, usando condiciones a cumplir antes y después de su ejecución, como JML [9] hace con Java o WS-CoL [10] con WS-BPEL.

Estas descripciones pueden integrarse con una serie de técnicas de prueba existentes, como los grafos causa-efecto de Paradkar [11] o la partición del espacio de entrada sugerida por Lohmann [12].

4. Estado Actual de las Herramientas

Las herramientas de la metodología SOD-M, tal y como se recibieron en marzo del 2009 del grupo Kybele, se hallaban desarrolladas como extensiones de la plataforma de desarrollo Eclipse, impulsada por IBM. Su flexibilidad se debe a que todo lo hace con componentes externos integrados por un núcleo mínimo.

En particular, empleaban los populares marcos de trabajo Eclipse Modeling Framework (EMF) y Graphical Modeling Framework (GMF). EMF permite implementar los modelos dando una especificación abstracta de su estructura. GMF permite conseguir editores gráficos más cómodos para el usuario a partir de una serie de especificaciones más detalladas y de retoques manuales sobre el código generado.

Sin embargo, EMF y GMF por sí solos imponen un flujo de trabajo que carece de la robustez y agilidad necesaria para permitir la experimentación sobre distintos enfoques que requiere la implementación de las propuestas realizadas en el anterior apartado. Se han integrado una serie de técnicas dirigidas a resolver estos problemas:

3. Las especificaciones de los modelos para EMF ahora se hacen en formato texto, mediante el editor Emfatic, potenciando su manipulación automática.

4. Se utilizan los lenguajes definidos por el proyecto Epsilon para manipular automáticamente los modelos, validándose con EVL y transformándose con ETL y EWL.
5. Se emplea EuGENia para producir las especificaciones para GMF en combinación con programas escritos en el lenguaje EOL de Epsilon, evitando depender de una versión concreta y automatizando los retoques manuales.
6. El proceso de obtención de los editores gráficos a partir de los modelos iniciales se ha automatizado con Apache Ant, tras añadir los aspectos que aún no eran automatizables.

Utilizando este flujo de trabajo mejorado, se reemplazaron dos de las herramientas recibidas de Kybele con nuevas versiones desarrolladas desde cero que incorporaban las extensiones propuestas para modelar el rendimiento del sistema, junto con:

Validación automática de los modelos, ofreciendo la posibilidad al usuario de corregir automáticamente sus errores en la mayoría de los casos.

Completado de las restricciones de rendimiento no especificadas manualmente por el usuario, evitando que las restricciones manuales se contradijeran entre sí.

Transformación automática entre los modelos extendidos, para que el usuario pueda rápidamente empezar a definir los modelos más detallados.

5. Validación

Para validar la metodología y la implementación de las herramientas, se aplicaron sobre un caso práctico inspirado en una parcela del negocio de una importante empresa del sector tabaquero.

Tras recopilar información sobre la organización y sus prácticas, se elaboró un modelo de los intercambios de valor producidos en la organización (propuestos por Gordijn [13]) y se definió un diagrama de actividad UML (parecido a un diagrama de flujo) con el proceso de negocio de la organización.

A partir de estos dos modelos, se estableció una lista de los servicios a ofrecer por el sistema, y tras varios pasos se produjo un modelo que descomponía las 46 tareas concretas a implementar en el sistema, y seleccionaba las que se ofrecerían como servicios reutilizables en el resto de la organización.

Cada una de estas 46 tareas incluía sus propias anotaciones sobre el rendimiento esperado a una determinada carga. Sólo hubo que especificar el

rendimiento esperado para los servicios: la estructura de los diagramas de actividad y las estimaciones de probabilidades de sus arcos proporcionaron la información necesaria a los algoritmos de completado de estimaciones.

La aplicación de esta primera versión parcial de la metodología fue positiva, permitiendo especificar de forma detallada un sistema partiendo únicamente de una descripción inicial de sus prácticas actuales de negocio y los participantes involucrados. Sin embargo, la metodología aún no se halla completa: no se genera código, y no se llegan a ejecutar las pruebas definidas. Estas características se irán añadiendo gradualmente en el futuro, y se describen en más detalle en el apartado posterior.

6. Conclusiones

Las empresas de fabricación pueden aprovechar las arquitecturas orientadas a servicios para integrar nuevas técnicas y prácticas de negocio más rápidamente y a menor coste. Sin embargo, es necesario tener una metodología que defina el proceso a seguir, y que dirija las pruebas sobre dicho sistema. En este trabajo se ha propuesto una forma de llegar a dicha metodología, y se han ofrecido los primeros resultados.

Se ha seleccionado SOD-M, la metodología SOA propuesta por el grupo Kybele de la Universidad Rey Juan Carlos, y se han propuesto una serie de extensiones para que pueda modelar las pruebas del sistema. Parte de estas extensiones se han implementado dentro de la plataforma Eclipse de IBM, y se han validado con éxito dentro de un caso de negocio dedicado a una empresa del sector tabaquero.

En un futuro, se planea revisar la última versión de la metodología SOD-M, que ha cambiado en paralelo con el desarrollo de este trabajo, e integrar los nuevos aspectos que se consideren de interés. La herramienta se hará más cómoda y completa, permitiendo generar al menos parcialmente el código del sistema y sus pruebas, ejecutar las pruebas y analizar sus resultados sobre el modelo.

6. Referencias

- [1] M. Marcos, F. Aguayo, M. Sánchez Carrilero, L. Sevilla, y J.R. Lama, *Toward the Next Generation of Manufacturing Systems. Frabiho: a Synthesis Model for Distributed Manufacturing*, Proceedings of the First I*proms Virtual Conference, Elsevier (2005), págs. 35-40.
- [2] A. Tharumarajah, A. Wells, y L. Nemes, *Comparison of emerging manufacturing concepts*, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, CA, USA (1998), págs. 325-331.
- [3] Z. Stojanović, *A Method for Component-Based and Service-Oriented Software Systems Engineering*, Delft University of Technology (2005).
- [4] S.G. A. Arsanjani y A. Allam, *SOMA: a method for developing service-oriented solutions*, IBM Systems Journal 47 (2008), págs. 377-396.
- [5] M.V. de Castro, *Aproximación MDA para el desarrollo orientado a servicios de sistemas de información web: del modelo de negocio al modelo de composición de servicios web*, Universidad Rey Juan Carlos (2007).
- [6] Object Management Group, *MDA Guide version 1.0.1* (junio 2003), véase: <http://www.omg.org/mda/>.
- [7] A. García Domínguez, I. Medina Bulo, y M. Marcos Bárcena, *Hacia la Integración de Técnicas de Pruebas en Metodologías Dirigidas por Modelos para SOA*, Actas de las V Jornadas Científico-Técnicas en Servicios Web y SOA, Madrid (2009).
- [8] I. Medina Bulo, A. García Domínguez, F. Aguayo, L. Sevilla, y M. Marcos Bárcena, *Propuesta metodológica para la implementación de una arquitectura orientada a servicios en entornos de Sistemas de Fabricación Distribuida*, Actas del III Congreso Internacional de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Alcoy, España (2009), págs. 346-353.
- [9] L. Baresi, D. Bianculli, C. Ghezzi, S. Guinea, y P. Spoletini, *A Timed Extension of WSCoL*, Web Services, 2007. ICWS 2007. IEEE International Conference on, (2007), págs. 663-670.
- [10] L. Burdy, Y. Cheon, y D.R. Cok, *An overview of JML tools and applications*, International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT) 7 (junio 2005), págs. 212-232.
- [11] A. Paradkar, M.A. Vouk, y K.C. Tai, *Specification-based testing using cause-effect graphs*, Annals of Software Engineering 4 (enero 1997), págs. 133-157.
- [12] M. Lohmann, L. Mariani, y R. Heckel, *A Model-Driven Approach to Discovery, Testing and Monitoring of Web Services*, Test and Analysis of Web Services, Springer Berlin (2007), págs. 173-204.
- [13] J. Gordijn y H. Akkermans, *Value-based requirements engineering: exploring innovative e-commerce ideas*, Requirements Engineering 8 (julio 2003), págs. 114-134.

Problemática en el Taladrado de Materiales Compuestos CFRP

M. Álvarez Alcón⁽¹⁾, M. Sánchez Carrilero, M. Marcos Bárcena

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz, Escuela Superior de Ingeniería. C/Chile Nº 1, 11002 Cádiz, Teléfono 956015142

⁽¹⁾miguel.alcon@uca.es

Resumen

En el sector aeronáutico, el proceso de taladrado en una de las operaciones de mecanizado más utilizadas sobre materiales compuestos, debido a la necesidad de ensamblaje de los elementos estructurales. El taladrado de estos materiales presenta una serie de problemas como, delaminaciones, pérdida de calidad superficial o desgaste rápido y excesivo de la herramienta de corte. En este trabajo se lleva a cabo un estudio de la calidad superficial obtenida en muestras taladradas de materiales compuestos de matriz epoxi reforzado con fibra de carbono, utilizando diferentes herramientas, en función de la velocidad de corte aplicada y el avance impuesto.

1. Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías y materiales en el transporte aéreo es una preocupación continua en la industria aeroespacial, en este sentido, la reducción del peso de la estructura del avión permite la posibilidad de incorporar mayor carga sin necesidad de aumentar el consumo energético para su desplazamiento, colaborando de esta manera en la minoración del impacto medioambiental.

En el aspecto anteriormente mencionado, cobra especial interés el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales con características físico-química-mecánicas iguales o superiores a los ya existentes, pero con un común denominador, un menor peso estructural, y que a su vez, garanticen todas las condiciones de seguridad. En este sentido, el desarrollo de los materiales compuestos (composites) y sus tecnologías de producción, fabricación y mecanizado, ha sido uno de los avances más importantes en la historia de los materiales en las últimas décadas.

En una gran parte de los elementos estructurales de las aeronaves se efectúan uniones mediante procesos de remachado, alcanzándose en la mayoría de los casos, varias decenas de miles de remaches en la estructura integral. Este proceso de remachado requiere, previamente, un taladrado de dichos elementos. Generalmente, este taladrado se automatiza en grandes equipos CNC, sin descartar el taladrado semiautomático o el manual.

En consecuencia, la mejora del rendimiento de este proceso conlleva un enorme aumento en el rendimiento de la construcción de la aeronave. Esta mejora, no debe entenderse sólo en la línea de mejora continua de la planificación del

proceso, sino también en lo referente al empleo de herramientas cuya vida útil maximice la rentabilidad del mismo.

El mecanizado de los materiales compuestos difiere significativamente en muchos aspectos del mecanizado de materiales metálicos [1]. Uno de los problemas que presentan los materiales compuestos durante los procesos de mecanizado y concretamente en el proceso de taladrado, es el debido a la acción de la herramienta sobre dos o más materiales diferentes (matriz-refuerzo), lo que conlleva la necesidad de hacer converger los parámetros optimizados de mecanizado de cada uno de ellos con objeto de obtener el acabado exigido [2].

Los principales defectos que se originan en el taladrado de este tipo de materiales suelen ser, la delaminación, astillamiento, errores de forma y pérdida de calidad superficial de los taladros. De los diferentes tipos de defectos originados por el proceso de taladrado, la delaminación aparece como la más crítica [2-4].

Aunque no existe un índice de maquinabilidad válido para todos los materiales, para los materiales compuestos se utilizan los criterios de rugosidad, factor de delaminación, fuerza de empuje, par torsor y la presión específica de corte como los indicadores más importantes para evaluar su maquinabilidad [2-4].

Respecto al desgaste de las herramientas de corte, uno de los mecanismos más comunes está basado en la abrasión de la cara de desprendimiento de la herramienta de corte, como consecuencia del contacto de esta con las fibras utilizadas como refuerzo [5].

Aunque los tipos de herramientas más utilizadas siguen siendo las brocas helicoidales de acero rápido (HSS) y metal duro (WC) con o con

recubrimientos de TiN o CrN, las herramientas de PCD, a pesar de ser más caras que las herramientas de carburo, tienen mayor ciclo de vida, pudiéndose utilizar además con mayores velocidades de corte, con lo cual, se aumenta el rendimiento del proceso [6, 9].

La alta velocidad de corte juega un papel muy importante en los procesos de taladrado, con objeto de incrementar la productividad, el rendimiento del proceso y por tanto, minimizar los costes de producción. No obstante, son pocos los trabajos de investigación que se encuentran en la bibliografía referente al taladrado de alta velocidad en materiales compuestos con matriz polimérica, en [3, 10], llevan a cabo estudios con diferentes geometrías de brocas, llegando a la conclusión de que al aumentar la velocidad de corte, disminuye la fuerza de empuje y, por tanto, se minimiza la delaminación.

Otro de los parámetros a tener en cuenta en la pérdida de calidad de los orificios, es el relativo al desgaste de las herramientas, la pérdida de calidad y aumento los defectos de delaminación de los orificios realizados [5].

2. Metodología Experimental

Para el desarrollo experimental de este trabajo, se han realizado ensayos de taladrado en seco sobre materiales compuestos de matriz polimérica de resina epoxi reforzada con fibra de carbono en porcentaje de 40% - 60%, con disposición a 0 y 90°, apilados en espesor de 11 mm. Las dimensiones de la misma son 300x200x11 mm, Figura 1. Los ensayos han sido realizados en un Centro de Mecanizado EMCO VMC-300, equipado con control numérico SIEMENS, modelo 810 M, Figura 2.

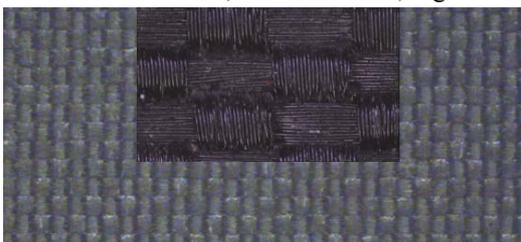


Figura 1. Estructura de la plancha de CFRP utilizada en los ensayos

Las herramientas utilizadas han sido brocas helicoidales de metal duro (WC-Co) sin recubrir y con recubrimientos de TiN y CrN y brocas de acero rápido (HSS) sin recubrir.

Tras cada tanda de ensayos, se ha llevado a cabo un estudio de la calidad superficial obtenida en los agujeros (en términos de Ra), haciendo uso de un rugosímetro Perthen, modelo Perthometer M1, Figura 3 (a).



Figura 2. Centro de Mecanizado CNC

Así mismo, los taladros realizados han sido inspeccionados mediante microscopía óptica estereoscópica, con objeto de observar los posibles defectos de rugosidad y delaminación originados tanto a la entrada como a la salida de la broca. Como soporte a dicha inspección, se ha utilizado un Equipo de Medición Óptica 3D (Tesa Visio 300), Figura 3 (b), con objeto de medir y analizar la zona dañada y la delaminación en los taladros realizados. Por otro lado, las herramientas utilizadas en los ensayos se sometieron, inicialmente, a una primera observación aplicando técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM). El equipo utilizado ha sido el microscopio óptico Nikon SMZ 800 equipado con una cámara digital cámara KAPPA DX10, Figura 3(c).

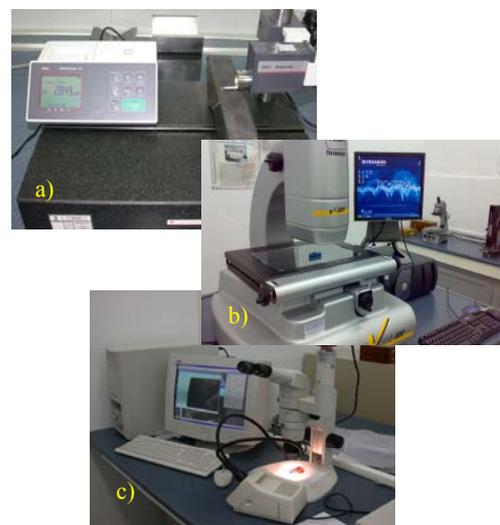


Figura 3. a) Rugosímetro de palpador tipo "Perthometer M1"; b) Equipo de medida óptico 3D; c) Microscopio estereoscópico Nikon SMZ 800

Todas las brocas utilizadas fueron del mismo diámetro, 4,81mm, de esta manera, esta variable pasa a ser un parámetro fijo en el proceso. En la Tabla 1, aparecen reflejados los parámetros utilizados en la fase experimental.

Tabla I. Parámetros utilizados

		Parámetros de corte			
∅ broca 4,81		$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$			
Vc [m/min]		60,00	60,00	60,00	60,00
Avance [mm/rev]		0,05	0,10	0,20	0,30
Vc/a [rev/min]		$1,20 \cdot 10^6$	$6,00 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^5$	$2,00 \cdot 10^5$

3. Resultados y Discusión

Con los parámetros reflejados en la tabla anterior, se realizaron diferentes tandas de ensayos para cada una de las brocas utilizadas, realizándose posteriormente las medidas de rugosidad de los taladros en términos de Ra. En la Figura 4, se puede observar la evolución del parámetro Ra, en función del número de taladros realizados, efectuados con bocas de WC con recubrimiento de TiN para distintas condiciones de corte. Como puede observarse, a medida que disminuye la relación v/a, la calidad superficial también disminuye por efecto del aumento del avance, lo que concuerda con los datos obtenidos en la revisión bibliográfica [5, 11, 12]. Este hecho, puede venir provocado por el desgaste paulatino de la herramienta, acelerado cuando las condiciones v/a disminuyen.

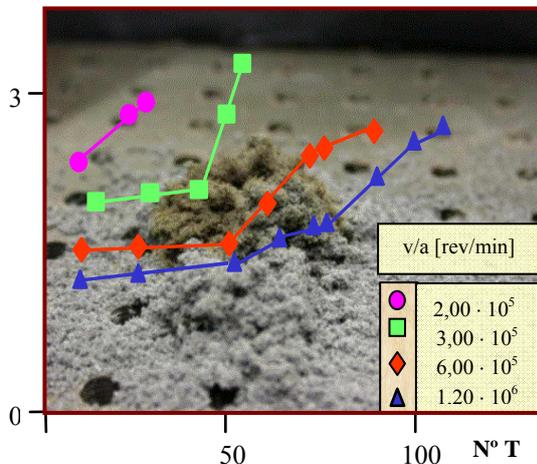


Figura 4. Evolución de Ra con el número de taladros para distintas relaciones v/a. (Herramienta: TiN)

Una vez realizadas las medidas de rugosidad, los agujeros fueron observados mediante microscopia óptica estereoscópica para inspeccionar los posibles defectos originados tanto a la entrada como a la salida de la broca. En la Figura 5, se puede apreciar que el defecto predominante en los orificios es la delaminación, considerado por muchos autores como el más crítico en el taladrado de este tipo de materiales [1-5, 7, 12]. La delaminación junto con la calidad superficial de los taladros,

son los indicadores más utilizados para medir la eficiencia y rendimiento del proceso.

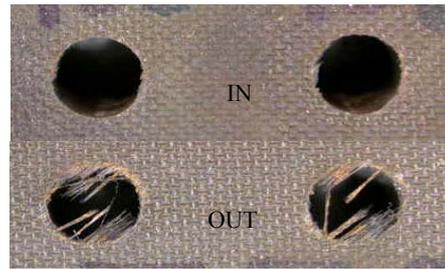


Figura 5. Delaminación en la cara de salida

Una vez obtenidas las mediciones de rugosidad, se realizaron mediciones de delaminación, determinándose el factor de delaminación F_D , a partir de la ecuación (1), definida por [2, 4, 12]:

$$F_D = \frac{D_M}{D_0} \quad (1)$$

Donde

D_M es el diámetro máximo de la zona dañada.

D_0 el diámetro nominal del agujero.

La medición de la zona dañada D_M , se llevó a cabo mediante técnicas basadas en análisis de imagen.

Finalmente, con objeto de realizar una comparativa cualitativa, se estableció un índice de calidad [2], QI , definido por la ecuación (2):

$$QI = \frac{K_I \cdot N_T}{R_a \cdot F_D} \quad (2)$$

En la ecuación (2) K_I depende de la relación v/a y N_T es el número de taladros antes de la rotura de la broca. Los resultados obtenidos fueron analizados cuantitativamente y comparados entre los distintos ensayos. En la Figura 6, se muestran parte de estos resultados. Como puede observarse, el factor de delaminación depende directamente de la relación v/a.

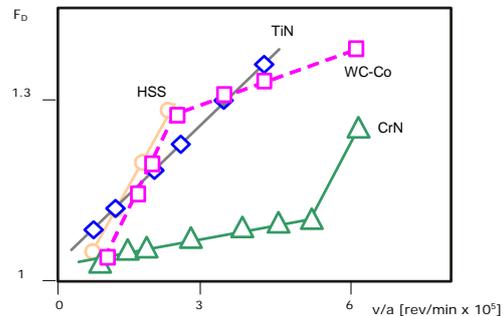


Figura 6. Factor de delaminación en función de la relación v/a para los distintos materiales de herramienta empleados

Los mejores resultados se obtienen para herramientas de metal duro con recubrimiento de CrN. No obstante, para velocidades de corte

medias y avances elevados (mínima relación v/a) prácticamente casi todos los materiales de herramientas han presentado un buen comportamiento, lo que concuerda con [4].

Los primeros análisis realizados a las brocas, han mostrado, el desgaste producido en las mismas debido al carácter enormemente abrasivo de la fibra de Carbono. Este hecho, provoca alteraciones de la geometría inicial. Así mismo, en las brocas con recubrimiento, se puede apreciar la pérdida de este recubrimiento y posterior desgaste de la herramienta, con lo cual, la misma pierde sus características y condiciones iniciales de corte, originando como consecuencia una disminución de calidad de acabado superficial en el interior de los orificios, errores de forma y aumento de la delaminación, Figura 7.

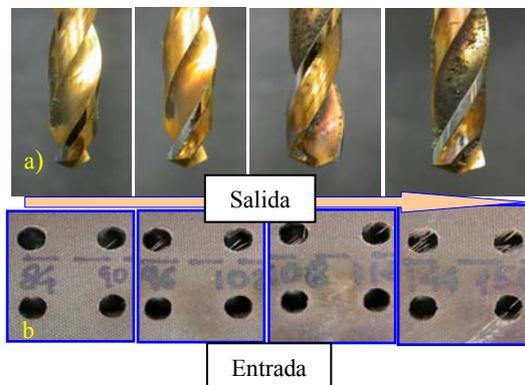


Figura 7. a) Evolución adhesión de partículas de FC y deterioro del filo de la hta. (Hta: TiN. v/a = 3350. $N_f=152$);
b) Evolución de la delaminación

4. Conclusiones

El taladrado de Fibra de Carbono conlleva una serie de problemas, tales como delaminación, errores de forma, pérdida de calidad superficial, desgaste rápido y excesivo de la herramienta de corte. Los resultados obtenidos en términos de Ra y Factor de Delaminación, han mostrado que para relaciones v/a inferiores a $3 \cdot 10^5$ rev/min, se obtienen resultados industrialmente aceptables cuando se mecaniza con herramientas de WC-Co recubiertas con CrN. Por otro lado, se ha llevado a cabo un primer estudio y análisis de la herramienta de corte, donde los resultados obtenidos han puesto de manifiesto que el principal mecanismo de desgaste en el mecanizado de materiales de matriz epoxi reforzado con fibra de carbono es el de abrasión, determinado por el carácter enormemente abrasivo de la fibra de carbono. Por otro lado, el efecto de desgaste de la herramienta afecta al rendimiento del proceso, en el sentido de que se aumentan las fuerzas de corte, de avance y el par.

5. Referencias

- [1] R. Teti. Difficult to Machine Materials: Fibre Reinforced Plastic Matrix Composites of Composite Materials. 2MESIC 2007.
- [2] M. Álvarez; M. S. Carrilero; B. Grille; J. M. Sánchez; F. Torres; M. Barro; J.M. González y M. Marcos. Estudio del Taladrado de Fibra de Carbono. Anales de Ingeniería Mecánica 14(1), 1635-1638. 2003.
- [3] V.N. Gaitonde; S.R. Karnik; J. C. Rubio; A. Esteves Correia; A. M. Abrao and J. P. Davim. Análisis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. Journal of Materials Processing Technology 203. 431-438. 2008.
- [4] A. M. Abrao; P.E. Faria; J. C. Rubio; P. Reis and J. P. Davim. Journal of Materials Processing Technology. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. 2007.
- [5] C.C. Tsao. and H. Hocheng. Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials. International Journal of Mechanical Sciences 49. 983-988. 2007.
- [6] F. Klocke and C. Wurtz, C. The Use of PDC Tools for Machining Fibre Reinforced Materials, Proc. of the ECCM - 8, Naples, 3-6 June: 509-515. 1998.
- [7] H. Hocheng and C.C. Tsao. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. International Journal of Machine Tools Manufacture 46. 1403-1416. 2006.
- [8] C.C. Tsao. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill. Materials and Design 29. 1740-1744. 2008.
- [9] E. Uhlmann; U. Lachmund and M. Brucher, M. Wear Phenomena on Diamond Coated Carbide Tools, Proc. of "The" Coatings in Manufacturing Engineering, Thessaloniki, 14-15 Oct.: 67-76. 1999.
- [10] S.C. Lin and I.K. Chen. Drilling of carbon fiber-reinforced composite material at high speed. Wear 194, 156-162. 1996.
- [11] W. Chen. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, International Journal of Machine Tools Manufacture. 37 (8) 1097-1108. 1997.
- [12] M. S. Carrilero, M. Álvarez, J.E. Ares, J.R. Astorga, M.J. Cano, M. Marcos. Dry drilling of fiber metal laminates CF/AA2024. A preliminary study. Material Science Forum, 526 (Advances in Material Processing Technologies). 73-78. 2006.

Procedimiento de obtención de casos de prueba de calidad para composiciones WS-BPEL

A. Estero Botaro, I. Medina Buló

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Escuela Superior de Ingeniería, C/ Chile, 1
(CP 11003) - Cádiz.
956015730 antonia.estero@uca.es, 956015780 inmaculada.medina@uca.es

Resumen

El gran auge que están alcanzando en los últimos años los Servicios Web y sus composiciones en WS-BPEL, hace necesario prestar especial atención a la prueba de este tipo de software. La prueba de mutaciones es una técnica que ha sido aplicada con éxito a la prueba de programas en diversos lenguajes, y permite mejorar la calidad del conjunto de casos de prueba inicial. Este artículo presenta un procedimiento mediante el cual, partiendo de casos de prueba generados aleatoriamente, se puede obtener un conjunto de casos de prueba de calidad para composiciones WS-BPEL. Para ello empleamos prueba de mutaciones y algoritmos genéticos.

1. Introducción

El lenguaje WS-BPEL [1] se caracteriza porque permite desarrollar procesos de negocio a partir de Servicios Web (SW) preexistentes y ofrecerlos como otro SW. La importancia económica que están alcanzando las composiciones WS-BPEL [2] obliga a prestar especial atención a la prueba de este tipo de software. Se han publicado trabajos relacionados con diversos aspectos de la prueba de composiciones en WS-BPEL, en su mayoría relacionados con la generación de casos de prueba [3,4,5,6,7]. Estos trabajos, excepto [4], no estudian la calidad de los casos de prueba generados.

La prueba de mutaciones es una técnica de prueba basada en fallos [8,9], que consiste en introducir fallos simples en el programa original mediante la aplicación de *operadores de mutación*. Los programas resultantes reciben el nombre de *mutantes*. Cada operador de mutación se corresponde con una categoría de error típico que puede cometer el programador. Si un caso de prueba es capaz de distinguir al programa original del mutante, es decir, la salida del mutante y la del programa original son diferentes, se dice que ese caso de prueba *mata* al mutante. Si por el contrario ningún caso de prueba es capaz de diferenciar al mutante del programa original, es decir, la salida del mutante y del programa original es la misma, se habla de un mutante *vivo* para el conjunto de casos de prueba empleado.

Un problema que plantea la prueba de mutaciones es la existencia de *mutantes equivalentes*. Éstos presentan el mismo

comportamiento que el programa original para cualquier caso de prueba, es decir, la salida del mutante y del programa original es siempre la misma.

La calidad de los conjuntos de casos de prueba se mide mediante la *puntuación de mutación*, que indica el número de mutantes muertos frente al número de mutantes no equivalentes. La prueba de mutaciones nos permite generar nuevos casos de prueba que maten a los mutantes que permanecen vivos, de manera que se mejore la calidad del conjunto inicial de casos de prueba.

Para aplicar la técnica de prueba de mutaciones a programas escritos en un lenguaje determinado es necesario disponer de un conjunto de operadores de mutación diseñados para ese lenguaje [10] y de un generador de mutantes.

En trabajos previos hemos diseñado un conjunto de operadores de mutación para WS-BPEL [11] y un sistema generador de mutantes que integra dichos operadores, este sistema se denomina GAmEra [12].

Un inconveniente que plantea la prueba de mutaciones es, el alto coste computacional que supone la ejecución del elevado número de mutantes que se genera a partir de un programa frente al conjunto de casos de prueba. Debido a esto se han propuesto distintas alternativas para la reducción de este coste, tales como el muestreo de mutantes [13], mutación selectiva [14], agrupamiento de mutantes [15] y mutación de orden superior [16].

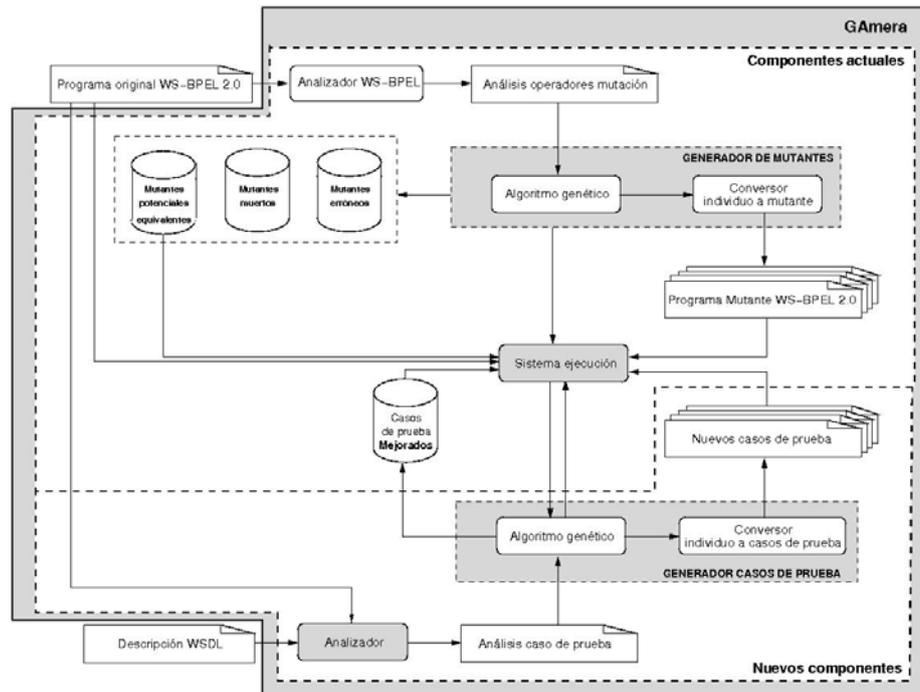


Figura 1. Arquitectura de GAmEra con el nuevo generador de casos de prueba

El sistema GAmEra incorpora un mecanismo de reducción del número de mutantes generados basado en un algoritmo genético (AG).

Los AG son una técnica de búsqueda probabilística basada en la teoría de la evolución y la selección natural. Se ha demostrado que constituyen una estrategia efectiva de optimización heurística para funciones con muchos óptimos locales.

Los AG trabajan con un conjunto de soluciones denominado *población*, formada por *individuos*. Los AG realizan un proceso de mejora de la población a través de las diferentes generaciones, por lo que resultan adecuados para la optimización. En este sentido, los AG favorecen a los mejores individuos y generan otros nuevos mediante la recombinación y la mutación de la información de los ya existentes. A cada individuo se asocia una *aptitud*, que representa la calidad de dicha solución con respecto al problema a resolver. El promedio de la aptitud de la población se maximiza a través de las diferentes generaciones producidas por el algoritmo.

La herramienta GAmEra genera sólo un subconjunto del total de mutantes que se pueden producir a partir de una composición WS-BPEL, estos mutantes son seleccionados mediante la función de aptitud y son mutantes de alta calidad.

El objetivo principal de este artículo es presentar un procedimiento que, partiendo de un conjunto de casos de prueba para composiciones WS-BPEL generado aleatoriamente, permita

obtener un nuevo conjunto de casos de prueba cuya calidad es superior.

2. Prueba de mutaciones en WS-BPEL

GAmEra genera mutantes a partir de una especificación WS-BPEL, los ejecuta frente a un conjunto de casos de prueba y determina si los mutantes han muerto, permanecen vivos o son erróneos. La Figura 1 muestra la estructura de GAmEra. En ella podemos observar cómo tras recibir la composición original en WS-BPEL, GAmEra obtiene un conjunto de mutantes clasificados en potencialmente equivalentes, muertos y erróneos.

Los mutantes potencialmente equivalentes incluyen a los mutantes equivalentes y a los *mutantes resistentes*. La existencia de estos últimos determina que el conjunto de casos de prueba inicial no tiene calidad suficiente para detectar los fallos representados por dichos mutantes, por lo que necesita ser mejorado. Los mutantes erróneos son aquellos que no pueden ser desplegados por el motor WS-BPEL, y por tanto, no pueden ejecutarse. Son debidos a que la transformación que realiza el operador de mutación que los produce no es válida sintáctica o semánticamente.

GAmEra no produce todos los mutantes posibles para una composición WS-BPEL, sino sólo un subconjunto de mutantes de calidad seleccionados mediante la función de aptitud del AG. Los criterios que utilizamos para seleccionar los mutantes son dos: fomentar los mutantes difíciles de matar y los mutantes potencialmente equivalentes. Los mutantes

Nº mensajes	Nº campos	Tipo 1	Valor 1	...	Tipo N	Valor N	...	Nº campos	Tipo 1	...
-------------	-----------	--------	---------	-----	--------	---------	-----	-----------	--------	-----

Figura 3. Representación de un caso de prueba

difíciles de matar son aquellos que mueren por un caso de prueba que sólo los mata a ellos. Los mutantes potencialmente equivalentes son los que han quedado vivos.

Con objeto de mejorar el conjunto de casos de prueba inicial vamos a añadir a GAmara nuevos componentes que nos permitan generar automáticamente casos de prueba.

3. Procedimiento propuesto

El procedimiento que se propone para generar un conjunto de casos de prueba de calidad para composiciones WS-BPEL consta de varios pasos que pueden verse en la Figura 1, y que se describen a continuación.

3.1 Análisis de programa original

La fase de análisis nos permite determinar los operadores de mutación que se pueden aplicar y las localizaciones dentro del programa donde pueden aplicarse.

3.2 Generación y ejecución de mutantes

La salida que se produce en la fase de análisis la toma como entrada el generador de mutantes para generar los mutantes adecuados. El generador de mutantes está basado en un AG en el que cada individuo representa un mutante.

La Figura 2 muestra la estructura de un individuo, formada por tres campos: el operador de mutación que se aplica, la localización dentro del programa en la que se va a aplicar y un atributo que determina el nuevo valor que tomará el elemento a mutar.

Operador	Localización	Atributo
----------	--------------	----------

Figura 2. Representación de un mutante

La función de aptitud guía la selección de los mutantes a generar. Esta función beneficia a los mutantes difíciles de matar (los que mueren por un caso de prueba que sólo los mata a ellos) y los mutantes potencialmente equivalentes.

$$Aptitud(I) = M - \sum_{j=1}^T (m_{Ij} \times \sum_{i=1}^M m_{ij})$$

Siendo T el número de casos de prueba, M el número de mutantes y m_{ij} el resultado de comparar la salida del mutante i y la del programa original frente al caso de prueba j . Si el caso de prueba j mata al mutante i , m_{ij} valdrá 1, por el contrario, si el mutante queda vivo, m_{ij} valdrá 0.

Los mutantes y el programa original se ejecutan frente al conjunto de casos de prueba inicial. La comparación de las salidas de cada mutante y del programa original permite clasificar los mutantes en: potencialmente equivalentes,

mueren y erróneos. Los mutantes potencialmente equivalentes son los que han quedado vivos, y son los que nos interesan para que el generador de casos de prueba genere nuevos casos que los maten y, por tanto, aumente la calidad del conjunto de casos de prueba inicial.

3.3 Análisis del programa WS-BPEL y del fichero WSDL

Para poder generar nuevos casos de prueba de forma automática necesitamos conocer la estructura de los mensajes que constituyen los casos de prueba. Éste es el objetivo de esta nueva fase de análisis, a partir de la cual obtendremos qué mensajes se intercambian los participantes en la composición de servicios, y de qué tipo son los campos que constituyen cada mensaje. La Figura 3 muestra la estructura del individuo que representa al caso de prueba.

3.4 Generación de casos de prueba

El generador de casos de prueba está basado en un AG en el que cada individuo representa a un caso de prueba. Este generador tiene como objetivo generar casos de prueba que maten a los mutantes resistentes, esto nos permitirá diferenciar a los mutantes equivalentes de los resistentes.

Por otro lado, la función de aptitud de este AG favorece a aquellos casos de prueba que matan un mayor número de mutantes, con objeto de minimizar el número de casos de prueba.

$$Aptitud(X) = \sum_{j=1}^M \frac{t_{Xj}}{\sum_{i=1}^T t_{ij}} \quad (2)$$

Siendo M el número de mutantes, T el número de casos de prueba, t_{ij} el resultado de ejecutar el mutante j frente al caso de prueba i . En este caso, t_{ij} también puede tomar los valores 0 ó 1, dependiendo de si el mutante permanece vivo o muere.

3.3 Ejecución de los mutantes vivos

De nuevo ejecutamos los mutantes que quedaron vivos en la fase 3.2 frente a los nuevos casos de prueba. Aquellos casos de prueba que maten a alguno de los mutantes que quedaron inicialmente vivos pasarán a engrosar el conjunto de casos de prueba inicial, mejorando así su calidad.

4. Conclusiones

Se ha presentado un procedimiento para generar casos de prueba de calidad para composiciones WS-BPEL.

El procedimiento está basado en la prueba de mutaciones, por lo que en primer lugar se aplica un generador de mutantes, basado en un AG. El AG nos permite obtener un subconjunto de mutantes de calidad de todo el conjunto posible, disminuyendo así el coste computacional que supone la ejecución de todos los mutantes posibles. La ejecución de estos mutantes frente al conjunto de casos de prueba inicial nos permite clasificarlos en muertos, potencialmente equivalentes y erróneos.

En un segundo paso aplicamos un generador de casos de prueba, también basado en un AG, que genera casos de prueba especialmente diseñados para matar a los mutantes resistentes. Los nuevos casos de prueba que matan mutantes resistentes pasan a formar parte del conjunto de casos de prueba, mejorándose la calidad del conjunto inicial.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Programa Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia y fondos FEDER mediante el proyecto SOAQSIm (TIN2007-67843-C06-04).

6. Referencias

- [1] OASIS: Web services business process execution language 2.0 (2007) <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>
- [2] Heffner, R., Real-world SOA: SOA platform case studies. Forrester Research (2005)
- [3] Dong, W.L, Yu, H., Zhang, Y.B., Testing BPEL-based Web Service Composition Using High-level Petri Nets. En: Proceedings of EDOC'06, pág. 441-444, IEEE CS (2006)
- [4] García-Fanjul, J. Tuya, J., de la Riva, C., Generación Sistemática de pruebas para composiciones de servicios utilizando criterios de suficiencia basados en transiciones. En: Libro de Actas de JISBD (2007)
- [5] Yan, J., Li, Z., Yuan, Y., Sun, W. Zhang, J., BPEL4WS Unit Testing: Test Case Generation Using a Concurrent Path Analysis Approach. En: Proceedings of ISSRE'06, pág. 75-84, IEEE CS (2006)
- [6] Yuan, Y., Li, Z., Sun, W., A Graph-Search Based Approach to BPEL4WS Test Generation. En: Proceedings of ICSEA'06, IEEE CS (2006)
- [7] Zheng, Y., Zhou, J., Krause, P., An Automatic Test Case Generation Framework for Web Services. Journal of Software, vol. 2(3), pág. 64-77 (2007)
- [8] DeMillo, R.A., Lipton, R.J., Sayward, F.G., Hints on test data selection: Help for the practicing programmer. Computer 11(4), pág. 34--41 (1978)
- [9] Offutt, A.J., Untch, R.H., Mutation 2000: uniting the orthogonal. Mutation testing for the new century, pág. 34-44 Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA (2001)
- [10] Amman, P., Offutt J., Introduction to Software Testing. Cambridge University Press, 2008
- [11] Estero Botaro, A., Palomo Lozano, F., Medina Buló, I., Mutation operators for WS-BPEL 2.0. En: Proceedings of the 21th International Conference on Software & Systems Engineering and their Applications (2008).
- [12] Domínguez Jiménez, J.J., Estero Botaro, A., García Domínguez, A., Medina Buló, I., GAmEra: An Automatic Mutant Generation System for WS-BPEL Compositions, En: European Conference on Web Services, ECOWS'09 (2009)
- [13] Acree, A.T., On Mutation, Tesis Doctoral, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia (1980)
- [14] Offutt, A. J., Lee, A., Rothermel, G., Untch R.H., Zapf, C., An experimental determination of sufficient mutant operators, ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 5(2), pág. 99-118, (1996)
- [15] Shamaila H., Mutation Clustering, Tesis Doctoral, King's College, London, (2008)
- [16] Jia, Y., Harman, M., Higher, Order Mutation Testing, Information and Software Technology, 51(10), pág. 1379-1393 (2009)

Propuesta metodológica para el estudio de los elementos de desgaste por adhesión secundaria de herramientas de corte

M. Batista Ponce, M. Marcos Bárcena

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz. Escuela Superior de Ingeniería. c/Chile s/n, 11002 Cádiz. Tlf: 956015123. email: moises.batista@uca.es

Resumen

Las aleaciones de aluminio se utilizan frecuentemente en la industria aeroespacial para la fabricación de elementos estructurales de aeronaves, debido a la excelente relación entre su peso, coste y propiedades mecánicas. Uno de los métodos que se sigue utilizando es el mecanizado por arranque de material. Para disponer de entornos de producción que no afecten al medioambiente está apareciendo la necesidad de mecanizar en ausencia de fluidos de corte. La supresión de estos, origina condiciones muy agresivas y alteraciones tanto en la herramienta como en la pieza, dando lugar a desviaciones sobre las especificaciones de diseño. Resulta por ello, necesario realizar estudios sobre el comportamiento de herramienta y pieza en estas condiciones de corte.

1. Introducción

La última concepción de la Ingeniería de Fabricación ha evolucionado desde la preocupación solo por el proceso hacia la planificación y el control por toda la vida del producto, desde su diseño hasta el final de su vida y la búsqueda de la eficiencia de cada una de sus fases. La justificación de esto se encuentra en la necesidad de obtener una rentabilidad de todos los productos y de cada fase de su proceso vital.

Este trabajo se ha desarrollado prestando especial atención a los procesos de conformado de material, es por esto que se ha estudiado alguno de los elementos que provocan la falta de rentabilidad de estos procesos. Dado que la reducción de tiempos muertos en máquina es uno de los objetivos a cumplir para conseguir esta rentabilidad, dado que los cambios de herramientas uno de los motivos que provoca una gran cantidad de estos tiempos muertos es se ha estudiado la forma de reducir los mismos y esta no es otra que maximizar la vida de la herramienta. Esto se puede conseguir, controlando el desgaste de las herramientas.

Dentro del desgaste de herramientas en general, las caras más implicadas son la cara de incidencia donde aparece desgaste de flanco y la de desprendimiento donde aparece desgaste de cráter. Así encontramos dos diferentes mecanismos de adhesión, por un lado la adhesión primaria donde el material de la herramienta se adhiere a la viruta, siendo arrancado de la superficie de esta en la fluencia de la viruta. Y el mecanismo de adhesión

secundaria donde es el material de la viruta el que queda adherido a la superficie de la herramienta. En este segundo caso, esta adhesión es inestable pudiendo desprenderse arrancando parte de la herramienta.

Es por esto que mientras en mecanismos de desgaste donde predomina la adhesión primaria, la herramienta se desgasta apareciendo los ya mencionados efectos, en mecanismos de desgaste por adhesión secundaria no suele aparecer este tipo de desgaste, sino que la morfología de la herramienta varía apareciendo los conocidos como Filo adherido o BUE (Built-Up Edge) y Capa adherida o BUL (Built-Up Layer), localizándose en el Filo de corte y en la cara de desprendimiento respectivamente (Figura 1).

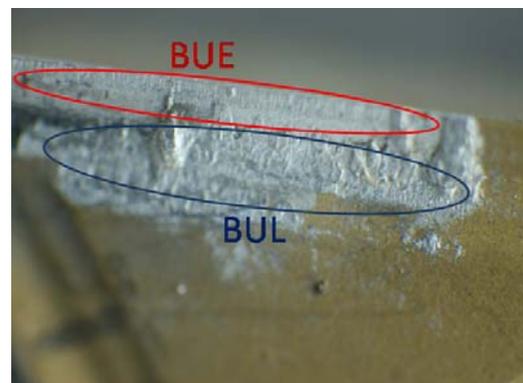


Figura 1. Adhesión de UNS A92024 en una herramienta de torneado tras 10 segundos de mecanizado.

Para intentar cuantificar estos efectos e intentar determinar la vida de la herramienta, se utilizan distintas técnicas, algunas directas y otras indirectas. Entre las directas se encuentran las técnicas ópticas y metrológicas, que cuantifican los efectos mencionados directamente, midiendo sobre elementos digitales tales como imágenes. Los indirectos intentan cuantificar los efectos a partir de otros parámetros relacionados como pueden ser la rugosidad de las piezas mecanizadas o la incidencia del proceso en la viruta. En la metodología propuesta se utilizarán todos estos procesos para intentar obtener un modelo de comportamiento lo más completo posible.

2. Metodología Experimental Propuesta

Siguiendo los protocolos establecidos en trabajos anteriores [1], se realizarán ensayos de torneado de distintas aleaciones ligeras. Se utilizarán aleaciones de amplio uso aeronáutico, como pueden ser las aleaciones de Aluminio-Cobre, Aluminio-Zinc y de Titanio aeronáutico. Se utilizarán herramientas de Metal Duro (WC-Co) Con y Sin Recubrimiento. Se utilizarán distintos tratamientos superficiales, tales como tratamientos térmicos o recubrimientos. Los ensayos se realizarán en un centro de torneado EMCOTurn 242 con ausencia de refrigerantes u otros fluidos de corte.

Estos ensayos consistirán en un torneado horizontal en seco. Se estudiará la evolución del desgaste tanto con la variación de los parámetros de corte así como con el tiempo de mecanizado. Para seleccionar estos valores se tendrán en cuenta otros trabajos precedentes, donde se haya visto la idoneidad de los mismos en este tipo de estudios [2].

Una vez realizados los ensayos, se realizará un estudio general de la herramienta, la pieza y la viruta mecanizada. Para ello se utilizarán técnicas de Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM) con un equipo Nikon SMZ 800 equipado con una cámara Kappa DX10 así como SEM y EDS (Microscopía electrónica de barrido y Espectroscopia de energía dispersiva).

Como equipos auxiliares para la metalografía, se utilizará una embutidora LaboPress-3 y una lijadora-Pulidora TegraPol-II de Struers.

También se utilizará un rugosímetro, Mahr Pertometer M1 y una máquina de formas Mahr para estudiar las desviaciones en las piezas mecanizadas.

2.1 Primera Fase. Piezas y Virutas

En esta primera fase, se realizará un estudio macrogeométrico y microgeométrico de la pieza mecanizada, para obtener desviaciones superficiales y de forma. Para ello se utilizará el rugosímetro y la máquina de formas.

Por otro lado, se realizará un estudio de la viruta. Se pretende identificar la viruta con respecto a la norma ISO 3685 [3] y caracterizarla en términos de longitud y peso.

Posteriormente, algunos fragmentos significativos escogidos, serán estudiados utilizando técnicas SEM y EDS.

Por otro lado, se tomarán fragmentos representativos de las virutas para crear pastillas con una resina en caliente con las distintas muestras, de forma que se obtuviera un corte transversal de las mismas para estudiar su sección.

2.2 Segunda Fase. Herramientas

En una segunda fase, se realizará un estudio de las posibles alteraciones morfológicas y geométricas sufridas por la herramienta durante el proceso de mecanizado. Se utilizarán las técnicas SOM/SEM/EDS.

Estas técnicas permitirán estudiar la tendencia de estas herramientas al desgaste por adhesión secundaria. Se realizará una toma de imágenes en distintas posiciones de la herramienta para evaluar dicho desgaste. Posteriormente se realizará un tratamiento gráfico de las imágenes tomadas para la adquisición de datos derivados de las mismas. Así para las imágenes en planta tomadas (Cara de Desprendimiento), se realizará una detección de fases, en las que se podrá determinar el porcentaje de la herramienta donde aparece material adherido (Figura 2). De igual forma sobre la vista lateral de la herramienta (Cara de Incidencia) se podrá realizar una medición directa con el software de tratamiento de imágenes.

Para poder utilizar esta función, el software debe ejecutar un proceso de calibrado, utilizando una regla patrón. De esta forma el software, una vez calibrado, permite cuantificar cada píxel con un número de micrómetros determinado. Para poder obtener datos comparables en ambos casos se obtendrán las imágenes utilizando la misma magnificación.

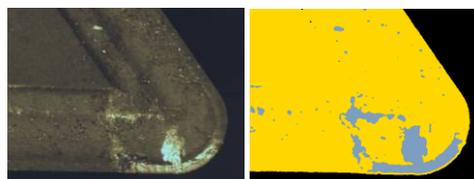


Figura 2. Ejemplo de figura insertada en el texto.

Además, las herramientas mecanizadas, serán segmentadas, cortando fragmentos de espesor submilimétrico, de en torno a 0,8 mm. De esta forma se podrá obtener una imagen 2D del material adherido. Además se podrá estudiar la composición de este en zonas muy próximas a

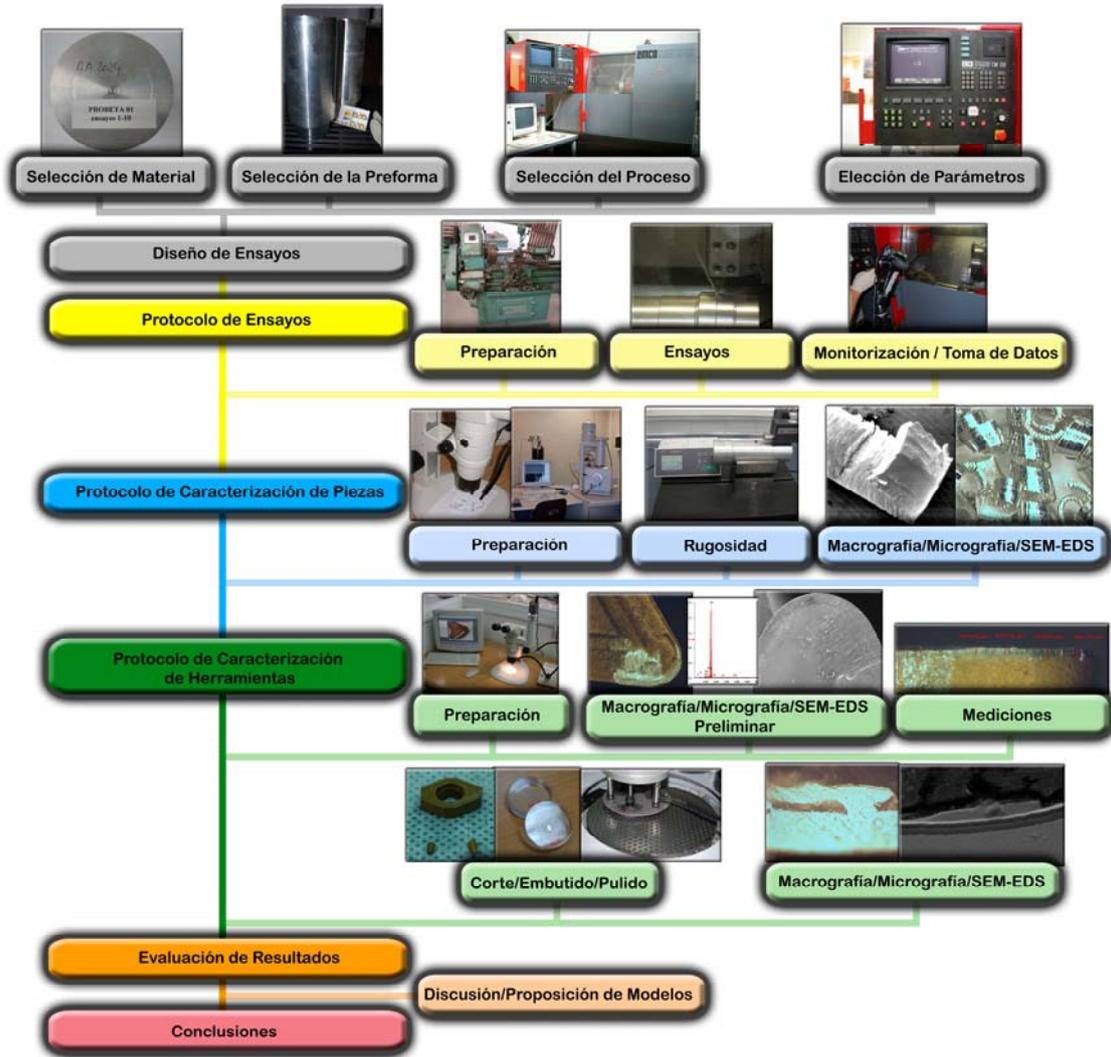


Figura 3. Metodología descrita

la superficie de la herramienta. El corte de las herramientas se realizará con una sierra de disco de precisión.

Además de lo ya descrito, se pretende modelar el comportamiento de todos los elementos estudiados, modelando la morfología de la viruta así como el material adherido como función de avance, velocidad y tiempo de mecanizado y apoyar los resultados obtenidos en imágenes de alta velocidad.

3. Resultados

Con la metodología experimental descrita (Figura 3), se obtendría por un lado una cuantificación 2D del desgaste y de los efectos de este:

- Para la viruta, al estudiar las secciones obtenidas en las muestras embutidas.
- Para la herramienta, al estudiar los cortes de las mismas.

En ambos casos, se obtendrían datos de composición de ambas muestras, donde

deberían aparecer las posibles difusiones surgidas en el proceso de mecanizado. Además se obtendrían datos de secciones de viruta y área de material adherido.

El problema que se plantea es el manejo de los pequeños elementos que lo componen. Por un lado, de los pequeños fragmentos de viruta de apenas unos milímetros de longitud y por otro de los fragmentos de menos de un milímetro de la herramienta.

Realizando pruebas, se ha determinado que la medición debe realizarse con una máquina de medición óptica como la Tesa Visio 300. Otras técnicas de medición óptica, no ofrecen los resultados deseados, ya que no poseen la calidad suficiente para realizar medidas tan pequeñas con la precisión requerida. En la Figura 4 se puede observar alguna de las pruebas realizadas. Por otro lado debido a la pequeñez de los fragmentos a cortar, la sierra de disco no ofrece los resultados esperados. Aún utilizando discos de precisión de pequeño espesor, los resultados son vagos. Uno de los principales problemas se

presentan por la fragilidad que ofrece el metal duro, es por esto que se ha fijado la Electroerosión por Hilo (WEDM) como el proceso idóneo para el corte de estos fragmentos, ya que, por un lado, el corte de WC con WEDM es un proceso perfectamente estudiado y de buenos resultados. Por otro lado, el pequeño espesor del hilo, 0,25 mm de diámetro, hace que la pérdida de material sea la mínima posible, por debajo incluso de cortes con discos de diamante de precisión. Además no se ejerce fuerza tangencial sobre la herramienta, no produciéndose fracturas. Por otro lado, este proceso deja una pequeña capa afectada en el fragmento de en torno a 20 μm de espesor, conocida como capa blanca. Dado que los fragmentos obtenidos, serán igualmente embutidos en una pastilla, para posteriormente ser esmerilados y pulidos, en este proceso, se eliminará la pequeña capa afectada por el corte. En la Figura 5 se puede observar un ejemplo de corte.

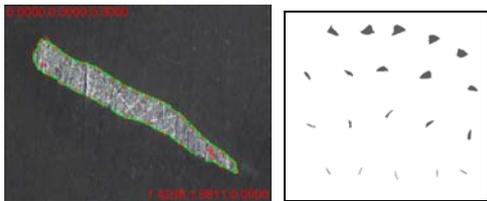


Figura 4. Ejemplo de corte con WEDM de una herramienta, del pulido y del embutido del fragmento.



Figura 5. Ejemplo corte transversal de una herramienta.

De forma similar, se buscará métodos para obtener una cuantificación 3D de las muestras:

- Sobre la viruta, se debe estudiar la forma idónea para cuantificando el volumen, peso y forma de la misma.
- Sobre la herramienta, con la realización de distintas pruebas, se ha visto como es posible medir el porcentaje de material adherido y el tamaño de este utilizando técnicas de procesado de imágenes. Pero se debe buscar la forma de realizar una cuantificación del material adherido en volumen, peso u otro parámetro físico para su posterior comparación.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la adhesión secundaria es el principal mecanismo de desgaste en el mecanizado en

seco de aleaciones de aluminio. Dicha adhesión comienza con la formación mediante causas termomecánicas de una capa de aluminio puro (BUL, Built-UP Layer) sobre la cara de desprendimiento. Esta capa permite la adhesión mecánica posterior de material de la aleación en el filo (BUE, Built-UP Edge). El BUE crece hasta que el arrastre de la viruta lo extrude sobre la cara de desprendimiento formando un BUL secundario mecánicamente adherido, dejando de crecer en este proceso. Este proceso se repite hasta un tamaño crítico en el que el BUL-BUE secundario es arrastrado por la propia viruta, pudiendo llevar, en su caso partículas de la herramienta dando lugar a su desgaste.

Este proceso aparece en los primeros instantes de mecanizado de forma casi inmediata. Aunque no parece ser decisivo en la integridad estructural de la herramienta. Es por esto que en el mecanizado de aleaciones de aluminio-cobre, la ausencia de fluidos de corte favorece el proceso de adhesión secundaria ya que la primera adhesión es un proceso termodinámico favorecido por la temperatura. Además este proceso hace cambiar las condiciones geométricas iniciales de la herramienta, lo que puede provocar unas desviaciones microgeométricas que pueden hacer que la pieza deba ser desechada. Pese a esto, dado que el mecanismo dominante es conocido y puede estudiarse, pueden disminuirse los fluidos de corte, llegando incluso a eliminarse en procesos estudiados, sin perjuicio final de la pieza mecanizada.

5. Agradecimientos

En su caso, se podrá incluir un apartado dedicado a los agradecimientos, en caso de que el desarrollo de la investigación disponga de alguna fuente de financiación pública

6. Referencias

- [1] M. Batista, Caracterización de elementos de desgaste de herramientas de corte por adhesión secundaria en el torneado en seco de aleaciones de aluminio. Trabajo de Investigación. Master Oficial en Ingeniería de Fabricación. 2008
- [2] Carrilero, M.S.; Marcos, M.; Sánchez, V.M.; *Journal of Mechanical Behavior of Materials*, 7 (1996) pp. 167-178.
- [2] Sánchez, J.M.; Álvarez, M.; Sebastián, M.A.; Marcos, M.; *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165 (2005) pp. 911-918.
- [3] ISO 3685:1993, Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.

Propuesta Metodológica para la Caracterización Metrológica del Taladrado de Materiales Compuestos de uso Estratégico en la Industria Aeronáutica

J. E. Garófano López⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena

Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, C/ Chile 1, 956015257,
⁽¹⁾jenrique.garófano@uca.es.

Resumen

En este documento se muestra una declaración de intenciones para la realización de una metodología que permita la caracterización metrológica, desde el punto de vista dimensional y geométrico, del taladrado previo al remachado de estructuras aeronáuticas de materiales compuestos mediante procesos semi-automáticos.

1. Introducción

Desde sus inicios, una preocupación continua en la industria aeroespacial ha sido el desarrollo de tecnologías y materiales que abran nuevas vías en el transporte aéreo. Hoy día, la mayoría de las compañías aeronáuticas contemplan el uso de aleaciones de aluminio y/o titanio en la fabricación de elementos estructurales de las aeronaves. Estas aleaciones se han venido utilizando debido a su excelente relación peso/propiedades físico-químicas/coste. La continua búsqueda de mejoras en el rendimiento productivo y en servicio de los conjuntos aeronáuticos conlleva el desarrollo de materiales que optimicen la relación anteriormente expuesta. En este sentido, se consideran abiertas tres vías de investigación que tiendan a mejorarla:

1.1 Disminución de peso. La reducción de peso de la estructura del avión permite la posibilidad de incorporar una mayor carga sin necesidad de aumentar el consumo energético para su desplazamiento. Esta reducción de peso contempla el empleo de materiales más ligeros que, como mínimo, aseguren las mismas propiedades que los utilizados tradicionalmente, lo que garantiza un mantenimiento de las excelentes condiciones de seguridad demostradas hasta el momento. Estos ambiciosos objetivos requieren un cambio revolucionario en la tecnología aplicable a este sector industrial. En esta línea se encuentran las investigaciones tendentes a la aplicación de materiales no metálicos que provoquen una marcada reducción de peso, como es el caso de los materiales compuestos de matriz orgánica (NMMC, Non-Metal Matrix Composites), especialmente los reforzados con Fibra de Carbono (FC), cuyo empleo está cada vez más extendido y su porcentaje de presencia en las

aeronaves es cada vez más elevado. De hecho, aunque el uso de materiales compuestos para la fabricación de componentes de estructuras aeronáuticas en aviones comerciales puede retrotraerse al programa ACEE (Aircraft Energy Efficiency) de la NASA en los años setenta, actualmente, el empleo de materiales compuestos en estructuras aeronáuticas es muy alto tanto en aviones comerciales de última generación como el Boeing 787 o el Airbus A350, Figura 1, en los que los materiales compuestos pueden constituir más del 50% de la estructura, como en aviones militares (A 400M) o helicópteros, en los que, en algunos casos, llega, incluso, a superarse con amplitud.

1.2 Mejora en las propiedades físico-químicas. La mejora de las propiedades se busca desde la incorporación de materiales como las aleaciones de titanio (fundamentalmente la aleación Ti6Al4V), ligeras, con buenas propiedades mecánicas y altamente resistentes a la corrosión, o como los ya mencionados NMMC que permiten, solos o en combinación con otros materiales metálicos formando FML (Fiber Metal Laminates), disponer de excelentes valores de muchas propiedades fisicoquímicas con una notable reducción del peso efectivo.

1.3 Disminución del coste. Actualmente, a la hora de hacer referencia al coste, no deben tenerse únicamente en cuenta los aspectos económicos en términos absolutos, sino que, adicionalmente, también deben contemplarse los aspectos relacionados con el impacto medioambiental de los materiales y su procesado.

Todo lo anterior, justifica y demuestra la consolidación de los materiales compuestos (especialmente los de fibra de carbono) dentro de la industria aeroespacial. Aspectos como rigidez o resistencia específicas superiores

unidos a la mejora de los costes por reducción de tiempos de mano de obra y a la utilización de procesos respetuosos con el medio ambiente, hacen de estos materiales una solución técnica más atractiva para diferentes sectores de la industria.

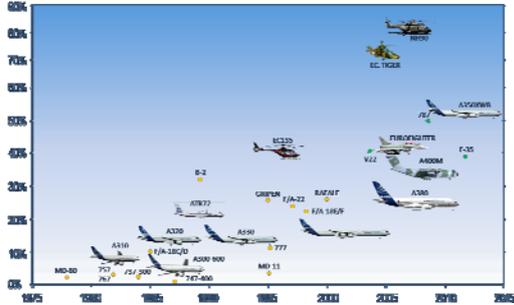


Figura 1. Evolución en el uso de materiales compuestos.

La masiva incorporación de materiales compuestos, primordialmente los compuestos de fibra larga unidireccional y matriz polimérica, a las estructuras aeronáuticas, hace que el diseño de la unión entre dichos materiales con las partes primarias (metálicas) de las aeronaves se haya convertido en un problema de gran importancia estructural.

Entre las dos alternativas principales habitualmente empleadas en el sector aeronáutico, remachado y unión adhesiva, el más generalizado es el de uniones remachadas. La gran mayoría de los montajes aeronáuticos están basados en filas enteras de taladros y remaches para fijar la “piel” del ala o fuselaje sobre las costillas de la estructura esqueleto. La importancia de estos elementos obliga a disponer de unos elevados requisitos de calidad en el acabado de los agujeros desarrollados en el proceso de taladrado previo al remachado. La garantía de cumplimiento de estas exigencias debe basarse en un correcto control metrológico de los orificios. Precisamente, en la línea de lo apuntado en este último aspecto, se puede enmarcar el trabajo que aquí se presenta, cuyo objetivo principal es establecer una metodología que permita la caracterización metrológica de dichos orificios desde los puntos de vista dimensional y geométrico.

2. Antecedentes

Uno de los aspectos más relevantes en el diseño de una aeronave es la seguridad. A pesar de la situación de crisis, actualmente se cifra en casi unos 30000 el número de aviones que cruzan diariamente Europa, lo cual supone una cifra cercana a los once millones de aviones anuales. A pesar de esta elevada cifra, el número de accidentes es enormemente bajo, si bien, la

espectacularidad de los mismos obliga a prestar una especial atención a sus causas y a desarrollar investigación que, en la medida de lo posible reduzcan aún más este número. Una de estas vías de investigación contempla el desarrollo y control en servicio de materiales mucho más resistentes. La resistencia de los materiales, y de los conjuntos que forman parte puede verse negativamente afectada en origen por el propio conjunto de procesos de fabricación a los que se someten los materiales antes de su puesta en servicio. Dentro de estos procesos, unos de los que más pueden afectar a las propiedades de los materiales son los procesos de mecanizado. Los estudios de estos procesos no deben realizarse sólo buscando condiciones de mejora como las apuntadas sino que deben, a su vez, perseguir objetivos adicionales en los que, como se ha dicho, se evite un impacto negativo en el medioambiente dentro de unos costes económicos razonables.

Básicamente, en la industria aeroespacial son tres los tipos de mecanizado a los que se someten los distintos materiales empleados en la construcción de aeronaves: taladrado, torneado y fresado. Dados el objetivo.

En la industria aeronáutica, el proceso de taladrado se emplea fundamentalmente dentro del conjunto de actividades previas a las operaciones de montaje. Un ensamblaje aeronáutico se hace principalmente mediante operaciones de remachado lo que conlleva el taladrado y avellanado de la superficie estructural de fijación. En un avión se pueden encontrar entre veinticinco y cincuenta mil taladros, condición suficiente como para prestar especial atención en el procesado de estas operaciones. Actualmente, la investigación en este campo se orienta hacia el denominado *One Way Assembly* (OWA), en el que se propone reducir el número de etapas del proceso de montaje, Figura 2 (A,B). En este marco, pueden considerarse dos grandes líneas de investigación dentro de lo que es el taladrado de componentes aeronáuticos:

a. Automatización. A pesar de la tecnología punta empleada en el sector aeroespacial, todavía se recurre al taladrado semiautomático en gradas debido a la falta de equipos para abordar este proceso para grandes elementos del fuselaje del avión. Hoy día el taladrado/remachado automático constituye una de las asignaturas pendientes dentro del citado sector.

b. Empleo de Tecnologías Limpias. Enfocado principalmente a la realización de procesos de taladrado en seco, evitando el empleo de lubricantes y/o refrigerantes que puedan perjudicar el medioambiente. El taladrado en seco es especialmente crítico en estructuras

FML en las que se combinan materiales muy sensibles a los fluidos de corte, como la fibra de carbono, con otros materiales cuyo mecanizado necesita del empleo de este tipo de fluidos, como es el caso de las aleaciones de Ti.

c. Mejora de la Productividad. También en este aspecto resulta especialmente importante el caso de estructuras multicapa FML. En efecto, el taladrado de materiales disimilares obliga, en origen, a realizar dos procesos de taladrado con parámetros y evacuación de viruta (o polvo) diferentes, empleando técnicas como el *peck-drill*. Así, en el caso de FC/Ti6Al4V, mientras que unos de los problemas presentados por la fibra de carbono se centra en la delaminación en la entrada y/o salida de la herramienta, Figura 2(C), el taladrado de aleaciones de Ti presenta la gran dificultad proporcionada por la elevada reactividad del titanio con el oxígeno que puede provocar, incluso la combustión de la viruta durante el mecanizado, especialmente agudizada en procesos de taladrado en seco, Figura 2(D). Uno de los objetivos más perseguidos desde hace años en este contexto se basa en conseguir taladros con las especificaciones de calidad requeridas efectuados en seco, en una sola pasada (OSDD, One Shoot Dry Drilling). Estudios realizados previamente en el grupo en el que se desarrollaría la Tesis Doctoral propuesta en el presente Proyecto, han puesto de manifiesto que, en una situación de automatización completa sería posible realizar procesos OSD en estructuras FML mediante una precisa adaptación continua de los parámetros. Sin embargo, las necesidades en planta sugieren profundizar en las investigaciones en otra línea mediante la selección de un conjunto de parámetros únicos durante todo el proceso OSDD que, además, contemple un diseño optimizado de la herramienta, tanto en lo referente a geometría como a material, partiendo de los avances realizados en los últimos años. De esa forma resulta esencial la caracterización geométrica de los orificios desarrollados en el proceso de taladrado.

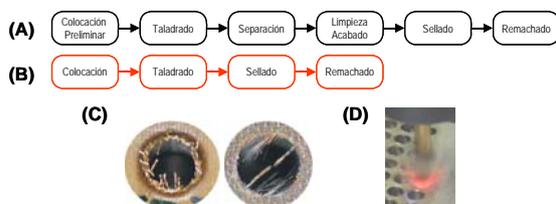


Figura 2. (A) Secuencia proceso taladrado-remachado en la industria aeronáutica. (B) Propuesta OWA. (C) Delaminación en taladrado de materiales compuestos de FC. (D) Taladrado en seco de Ti6Al4V

3. Metodología y plan de trabajo

Para poder alcanzar los objetivos propuestos es necesario establecer una metodología por tareas que permita abordar cada una de las fases de la investigación. De acuerdo con lo anterior, la secuencia metodológica a seguir constaría de cuatro etapas. La primera de ellas se llevará a cabo de forma paralela a las dos etapas siguientes, y en ella se establecerá y se actualizará de manera constante el estado del arte en la materia por medio de una exhaustiva recopilación bibliográfica. En la segunda etapa, se realizará el estudio básico sobre los procesos de taladrado de los materiales compuestos de fibra de carbono, mientras que en la tercera se estudiará y validarán los métodos empleados para determinación de los protocolos empleados para la evolución de los parámetros empleados en el sector aeronáutico. Por último, la cuarta etapa constará de las tareas propias de elaboración y publicación de los resultados obtenidos en distintos foros científicos.

A continuación se resumen las principales tareas.

Etapa 1. Estudio previo

1.1 En esta etapa se realizarán reuniones con las empresas interesadas, con el fin de conocer los problemas existentes en las mismas de las mismas y las infraestructuras disponibles.

1.2 Revisión bibliográfica. Con objeto de poder disponer de una información actualizada de la temática, se efectuarán periódicamente búsquedas bibliográficas en las distintas fuentes disponibles.

1.3 Establecimiento del Estado del Arte. Mediante la continua revisión bibliográfica, se establecerá, de forma continuada en el tiempo, el Estado del Arte en la materia.

Etapa 2. Ensayos de Taladrado

2.1 Caracterización del material. Aplicando técnicas SOM/SEM/EDS (Microscopía Óptica Estereoscópica, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectroscopía de Energía Dispersiva) se caracterizará microestructural y microcomposicionalmente el material empleado en los procesos de taladrado.

2.2 Estudio de las herramientas de corte. Aplicando técnicas SOM/SEM/EDS (Microscopía Óptica Estereoscópica, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectroscopía de Energía Dispersiva) se caracterizará microestructural y microcomposicionalmente las herramientas de corte. La geometría de las mismas se supone que será facilitada por los fabricantes.

2.3 Ensayos de taladrado sobre probetas tipo. Sobre la base de los datos que se disponen de las empresas del sector aeronáutico del entorno socioeconómico, se llevarán a cabo ensayos de taladrado aplicando los valores más comunes de los parámetros tecnológicos correspondientes.

Etapa 3. Evaluación de los Orificios

3.1 Establecimiento de los métodos de medición. En una primera fase se definirán las variables dimensionales y geométricas para la caracterización de los orificios taladrados. Una vez establecidos, se llevará a cabo una primera propuesta metodológica para, de acuerdo con el equipamiento disponible, proponer los diversos métodos de medida a aplicar para la evaluación de los orificios desde los puntos de vista reseñados.

3.2 Medida y Evaluación. Sobre la base de lo establecido en el apartado anterior, se llevará a cabo la medición de los orificios en secuencias distintas con objeto de determinar la evolución de las desviaciones de diseño con el número de taladros en cada una de las condiciones estudiadas.

3.3 Elaboración de Modelos. A partir de los resultados obtenidos se podrán plantear modelos paramétricos para las distintas variables.

3.4 Validación de los métodos empleados y los modelos propuestos. Se desarrollarán ensayos en situaciones intermedias que permitan validar los modelos propuestos. Por su parte, trabajando en entornos controlados, se podrá llevar a cabo el proceso de validación del método aplicado

3.5 Elaboración del protocolo y propuesta final. A partir de todo lo anterior se llevará a cabo la elaboración de los protocolos de trabajo y se propondrá la metodología.

Etapa 4. Presentación de la Memoria y Difusión

4.1 Redacción del trabajo.

4.2 Difusión de resultados. Con objeto de dar a conocer las investigaciones llevadas a cabo, durante el desarrollo de las investigaciones se irán publicando resultados en diversos foros, fundamentalmente revistas y congresos y jornadas.

4. Bibliografía

1. A. Miravete, J. Cuartero, *Materiales Compuestos*, Volumen 2, 2003.
2. Bhagwan D. Agarwal, K. Chandrashekhara, *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Wiley; 3^o edición.
3. Peter Morgan, *Carbon Fibers and Their Composites*, CRC, 2005.
4. saac M. Daniel, Ori Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, USA; 2^a edición, 2005.
5. James C. Gerdeen, *Engineering Design with Polymers and Composites (Materials Engineering)*, CRC, 2005.
6. Autar K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*, CRC; 2^a edición, 2005.
7. Joseph H Koo, *Polymer Nanocomposites*, McGraw-Hill Professional; 1^a edición, 2006
8. Universidad Internacional de Andalucía, *Situación y perspectivas de la industria aeronáutica y espacial en Andalucía*; 2003.
9. Adam Quilter, *Composites in Aerospace Applications*; ESDU International.
10. Proyecto EETSE, *EADS y las Estrategias Territoriales del Sudoeste Europeo, Informe Nacional de los Territorios de Andalucía y Madrid*; Universidad Autónoma de Madrid, Instituto de Desarrollo Regional.
11. M. Marcos et al., Estudio del taladrado de estructuras FML, *Anales de Ingeniería Mecánica* 15(4), (2004), 2825-2830.
12. M. Marcos et al., Influencia de la relación velocidad de corte – avance en la calidad superficial de muestras taladradas de fibra de carbono, *Revista de Metalurgia Madrid Vol. Extraordinario* (2005), 361-364
13. M. Marcos et al., Dry Drilling of Fiber Metal Laminates CF/AA2024. A Preliminary Study, *Materials Science Forum* 526 (2006), 73-78
14. M. Marcos et al., Estudio del Taladrado de Fibra de Carbono, XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz, 2002
15. M. Marcos et al., Estudio del Taladrado en Seco de Estructuras Híbridas FC/AA2024, Primer Congreso Internacional de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Calatayud, 2005.

Una aproximación al estudio de la influencia del proceso de mecanizado en la corrosión bajo tensión de la aleación UNS A92024

J.E. Díaz Vázquez⁽¹⁾, M. Marcos Bárcena⁽²⁾, F.J. Botana Pedemonte⁽³⁾

^(1,2)Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, c/ Chile, 1. 11002 CÁDIZ, 956 015 132, enrique.diaz@uca.es.

⁽³⁾Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Avda/ de la República Saharaui, s/n. 11510 Puerto Real (CÁDIZ)

Resumen

Debido a sus buenas propiedades mecánicas, las aleaciones de aluminio se usan extensamente en la industria aeroespacial. Sin embargo, su comportamiento en servicio se ve afectado por la corrosión. Así, los elementos estructurales corroídos ven mermada su capacidad de transmitir y soportar esfuerzos. Además, algunas de las aleaciones usadas en la fabricación de las aeronaves son susceptibles a la corrosión bajo tensión. Los procesos de mecanizado utilizados comúnmente en la industria afectan de manera más o menos agresiva a la integridad superficial y, en consecuencia, podrían influir en la respuesta del material a la corrosión.

1. Introducción

Las aleaciones de aluminio se usan extensamente en la industria aeroespacial, debido a su buena relación entre resistencia y densidad. Sin embargo, y a pesar de sus buenas propiedades mecánicas, su comportamiento se ve afectado por la corrosión. En concreto, los procesos corrosivos previos influirán en el comportamiento en servicio, afectando a la respuesta de los elementos aeronáuticos a la tensión tras corrosión (TTC). Asimismo, algunas de las aleaciones de aluminio de uso aeronáutico son sensibles a la corrosión bajo tensión (CBT), cuyo resultado es una fractura súbita que ocurre, frecuentemente, sin la aparición de señales previas que sirvan de aviso y sin apenas deformación, y cuyas consecuencias pueden ser catastróficas para el material en servicio. Finalmente, y debido a la reciente tendencia a eliminar de las operaciones de mecanizado la utilización de fluidos de corte (debido a su alto coste medioambiental), las condiciones de arranque de material son más agresivas, afectando a la integridad superficial y, en consecuencia, influyendo en la respuesta del material a la TTC y favoreciendo la aparición de la CBT.

2. Estado del arte

La aleación UNS A92024 experimenta corrosión bajo tensión (CBT) en presencia del ión cloruro y estando sometida, simultáneamente, a fuerzas externas o tensiones residuales. La tensión necesaria para poner de manifiesto la corrosión bajo tensión puede ser

bastante inferior al límite de fluencia y suele ser de tracción [1]. La rotura por CBT ocurre frecuentemente sin la aparición de señales previas que pudieran servir de aviso y sin apenas deformación, por lo que las grietas debidas a la CBT tienen la apariencia de fracturas frágiles. Los efectos están limitados al lugar de la grieta y, normalmente, no aparece un daño significativo por corrosión uniforme hasta que se produce la fractura de forma súbita por el agrietamiento interno [2]. En la superficie del metal donde comienza la fisuración se incuba una microgrieta que progresa en profundidad y, a veces, casi sin pérdida de material [3].

A pesar de que la corrosión bajo tensión representa uno de los problemas más importantes [4] por su impacto en las diferentes ramas de la industria (aeroespacial, naval, nuclear, química, etc.) [3], el mecanismo implicado no se conoce bien y no se ha llegado a ningún consenso sobre un mecanismo general aplicable a cada sistema aleación-corrosivo [5]. La razón principal de esta situación es la interacción compleja del metal, de la interfase, y de las características del entorno. La información más confiable y útil se ha obtenido de experimentos empíricos [4].

La literatura acerca de la corrosión bajo tensión se divide en dos tipos generales, por un lado los estudios aplicados al desarrollo de medidas preventivas y, por otro lado, la investigación básica de los mecanismos de la corrosión bajo tensión [5].

En cuanto a las medidas de prevención, hay que tener en cuenta que el agrietamiento por

corrosión bajo tensión es un fenómeno combinado. Requiere tanto la acción de una tensión de tracción como la presencia de un medio corrosivo específico y que el material esté sensibilizado frente a este tipo de corrosión. La supresión de cualquiera de estos factores, representados en la Fig. 1, evitará la iniciación de grietas o detendrá las que estén ya propagándose [6]. Por otro lado, la inducción de tensiones de compresión mediante el granallado previene el inicio de grietas y su posterior crecimiento. Con este método se obtienen tensiones residuales de compresión hasta una profundidad de 250 μm en aluminio [7,8]. Montross [8] y Peyre [9] han estudiado el granallado por láser, en el que se obtienen profundidades de las capas comprimidas de hasta 1 mm.

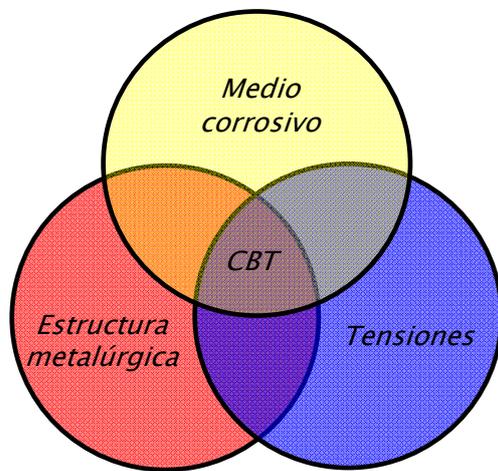


Figura 1. El triángulo de la CBT, adaptada de [6].

En cuanto a los mecanismos, el primer paso de la CBT de la aleación UNS A92024 expuesta a un medio corrosivo consiste en la eliminación de la película pasiva de óxido formada en su superficie. Una vez ha quedado expuesto el metal desnudo, este sufre un ataque con formación de picaduras o corrosión intergranular [4,10]. La existencia de una correlación entre las picaduras, la ruptura de la capa pasiva y la corrosión bajo tensión ha sido demostrada por Sinyavskii [11], que ha asociado las grietas transgranulares con las picaduras en canales estrechos y las intergranulares con picaduras en los bordes de grano.

La rotura de la capa de óxido puede producirse por agrietamiento de la misma en presencia de tensiones localizadas, cambios de potencial en dichas zonas u otras causas [4]. Está influida por otros parámetros como, por ejemplo, el acabado superficial [1,12,13]. Las grietas también pueden iniciarse en las discontinuidades del metal, como los surcos, entalladuras o rebabas

resultado de los procesos de fabricación [1] y que actúan como elementos concentradores de esfuerzos.

Dado que las grietas que aparecen en el proceso son intergranulares, los mecanismos deben explicarse por la estructura metálica en el entorno de los granos y sus bordes. Una interpretación se basa en la actividad anódica debida a la precipitación selectiva de fases intermetálicas en los bordes de grano [14] en contacto con las zonas desnudas del borde de grano y la propia matriz de la aleación. En las aleaciones de la serie UNS A92XXX (cobre-magnesio-silicio), los precipitados en el borde de grano incluyen al compuesto CuAl_2 , y la zona desnuda es anódica respecto al precipitado y a la matriz (véase la Fig. 2), pudiendo producirse pares galvánicos y creándose rutas para el avance de la grieta [15].

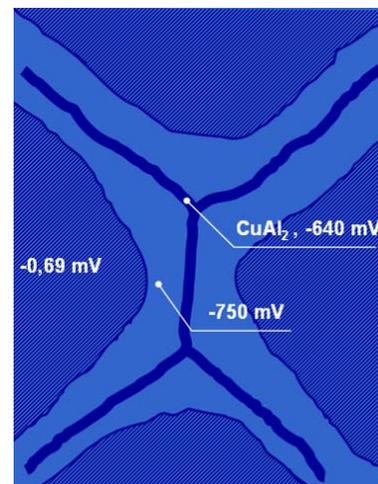


Figura 2. Precipitación intergranular en la aleación UNS A92024.

Finalmente, los procesos de mecanizado pueden modificar la microestructura y la textura de un volumen muy localizado de la pieza y pueden introducir tensiones residuales en la superficie de las piezas mecanizadas. Estos procesos afectan a la integridad superficial de la pieza [17]-[26] y al campo de tensiones [27]-[43]. Por ejemplo, los procesos abrasivos del amolado producen surcos en la superficie (véase la Fig. 3) y pueden llegar a transformar la estructura de los granos favoreciendo los procesos de corrosión intergranular.

Aunque está establecida, por un lado, la conexión entre la influencia de los procesos de mecanizado en la integridad superficial de las piezas y, por otro lado, la influencia de esta última en el inicio de los procesos corrosivos que afectarán a la TTC y a la CBT, es escasa la literatura que relacione directamente los

procesos de mecanizado con el comportamiento de los elementos a la TTC y a la CBT [44].

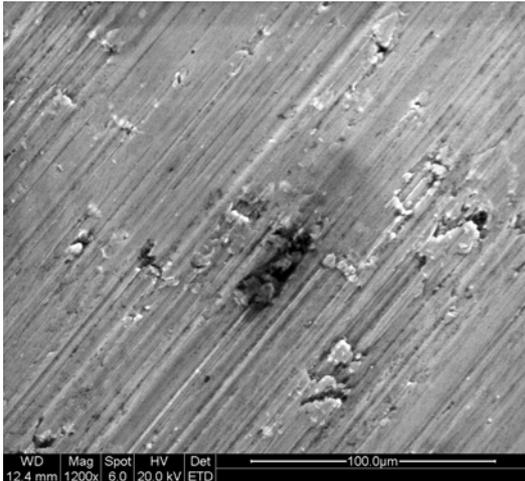


Figura 3. Superficie amolada de la aleación UNS A92024.

3. Conclusiones

En resumen, se puede decir que los mecanismos básicos de la CBT en la aleación UNS A92024 son conocidos, así como las medidas de protección. Los modelos propuestos explican cómo influye la integridad superficial en las condiciones que provocan, en un medio agresivo, la CBT en la aleación UNS A92024. En concreto, el inicio con la ruptura localizada de la capa pasiva en algún defecto superficial. Asimismo, los procesos de mecanizado afectan a la integridad superficial de la pieza e introducen tensiones residuales en un volumen muy pequeño de la misma. Sin embargo, no se han relacionado de manera directa los parámetros de los procesos de mecanizado con la sensibilidad a la CBT ni el comportamiento frente a la TTC de la aleación UNS A 92024.

En consecuencia, es de esperar que el proceso de mecanizado influya en la CBT de la aleación UNS A92024. Sin embargo, son prácticamente inexistentes los trabajos en los que se relacionan de forma directa y cuantificable los procesos de mecanizado con la CBT en las aleaciones de aluminio, lo que abre posibilidades de realizar un estudio en profundidad de la cuestión en un futuro.

4. Referencias

[1] ASM INTERNATIONAL. Handbook Committee, "Metals Handbook, v. 13A. Corrosion", 2 003.

[2] D. Talbot y J. Talbot, "Corrosion Science and Technology", CRC Press, Boca Ratón (EE. UU.), 1 998.

[3] M. Acha, *Corrosión bajo tensión de alambres de acero pretensado en medios*

neutros con HCO_3^- y alcalinos con SO_4^{2-} , Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid (España), 1 993.

- [4] M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3ª Edición, McGraw-Hill, N. Y. (EE. UU.), 1 987.
- [5] R. K. Singh Raman, R. N. Ibrahim, F. Wu, R. Rihan, *Metallurgical and Materials Transactions A* 39 (2 008) 1475-1478.
- [6] P. R. Roberge, "Handbook of Corrosion Engineering", 1ª Edición, McGraw-Hill, N. Y. (EE. UU.), 2 000.
- [7] A. King, A. Steuwer, C. Woodward, P. J. Withers, *Mater. Science and Engineering A* 435-436 (2 006) 12-18.
- [8] C. S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, Y. Mai, *I. J. Fatigue* 24 (2 002) 1021-1036.
- [9] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. P. Lieurade, *Mater. Science and Engineering A* 210 (1 996) 102-113.
- [10] D. Tanguy, B. Bayle, R. Dif, Th. Magnin, *Corrosion Science* 44 (2 002) 1163-1175.
- [11] V. S. Sinyavskii, *Prot. Met.* 37 (2 001) 469-478. Traducido de *Zashchita Metallov* 37 (2 001) 521-530.
- [12] A. Aballe, M. Bethencourt, F. J. Botana, M. Marcos, J. M. Sánchez-Amaya, *Corrosion Science* 46 (2 004) 1909-1920.
- [13] J. M. Sánchez-Amaya, T. Delgado, L. González-Rovira, F. J. Botana, *Appl. Surf. Science* 255(23) (2 009) 9512-9521.
- [14] M. Song, K. Chen, *J. Mater. Science* 43 (2 008) 5265-5273.
- [15] H. Vogt, M. O. Speidel, *Corrosion Science* 40 (1 998) 251-270.
- [16] T. Mathia, F. Louis, G. Maeder, D. Mairey, *Wear* 83 (1 982) 241-250.
- [17] S. Bissey-Breton, J. Farré, V. Vignal, N. Mary, *Mécanique & Industries* 8 (2 007) 193-197.
- [18] A. K. Jha, P. R. Narayanan, V. Diwakar, K. S. Kumar, M. C. Mittal, *Engineering Fail. Analysis* 11 (2 004) 463-474.
- [19] A. Javidi, U. Rieger, W. Eichlseder, *I. J. Fatigue* 30 (2 008) 2050-2055.
- [20] P. Dahlman, F. Gunnberg, M. Jacobson, *J. Mater. Processing Technology* 147 (2 004) 181-184.
- [21] D. Arola, C. L. Williams, *I. J. Fatigue* 24 (2 002) 923-30.
- [22] R. S. Pawade, S. S. Joshia P. K. Brahmankar, *I. J. Machine Tools & Manufacture* 48 (2 008) 15-28.
- [23] V. García Navas, I. Ferreres, J. A. Marañón, C. García-Rosales, J. Gil Sevillano, *J. Mater. Processing Technology* 195 (2 008) 186-194.

- [24] N. D. Hassiotis, and G. P. Petropoulos, *I. J. Machining and Machinability Mater.* 1 (2 006) 202-212.
- [25] J. Kuniya, I. Masaoka, R. Sasaki, S. Kiriara, *J. Mater. Energy Syst.* 1 (1 980) 30.
- [26] A. B. Rhouma, C. Braham, M.E. Fitzpatrick, J. Leidion, H. Sidhom, *J. Mater. Engineering and Perform.* 10 (2 001) 507-514.
- [27] B. Ekmekçi, N. Ekmekçi, A. E. Tekkaya, A. Erden, First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, Proceedings Of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, Cappadocia (Turquía), 2 004.
- [28] M. Koç, J. Culp, T. Altan, *J. Mater. Processing Technology* 174 (2 006) 342–354.
- [29] M. Mahdi, L. Zhang, *I. J. Machine Tools & Manufacture* 39 (1 999) 1285–1298.
- [30] X. Long, S.K. Khanna, *J. Engineering Mater. and Technology-Transactions of the ASME* 125 (2 003) 222-226.
- [31] M. Fattouh, M. M. El-Khabeery, *I. J. Machine Tools & Manufacture* 29 (1 989) 153-160.
- [32] M. M. El-Khabeery, M. Fattouh, *I. J. Machine Tools & Manufacture* 29 (1 989) 391-411.
- [33] K. Fuh, C. Wu, *J. Mater. Processing Technology* 51 (1 995) 87-105.
- [34] D. Stefanescu, C. E. Truman, D. J. Smith, P. S. Whitehead, *Experimental Mechanics* 46 (2 006) 417–427. B. S. K. Reddy, B. Ramamoorthy, P. K. Nair, *IE (I) Journal-PR* 86 (2 005) 35-38.
- [35] M. E. Fitzpatrick, J. E. Moffatt, A. Dubois, F. Gregoire, A. D. Tarrant, *Mater. Science and Technology* 18 (2 002) 1453-1457.
- [36] R. A. Waikar, Y. B. Guo, *Tribology Transactions* 50 (2 007) 531-539.
- [37] F. L. AmorimI, W. L. Weingaertner, *J. Brazilian Society of Mechanical Sciences* 24 (2 002) 194-199.
- [38] B. Ekmekçi, *Appl. Surf. Science* 253 (2 007) 9234–9240.
- [39] J. A. McGeough, H. Rasmussen, *I. J. Machine Tool Des. Res.* 22 (1 982) 333-339.
- [40] S. R. Ghabrial, *I. J. Machine Tool Des. Res.* 12 (1 972) 297-309.
- [41] J. Wallbank, *Metallurgia* 47 (1 980) 356-362.
- [42] S. H. Lee, X. Li, *J. Mater. Processing Technology* 139 (2 003) 315–321.
- [43] B. Denkena, D. Boehnke, L. de León, *Production Engineering Res. Development* 2(3) (2 008) 247-253.
- [44] Yu. I. Babei, I. I. Vasilenko, I. V. Karpenko, *Mater. Science* 2(4) (1 967) 323-327. Traducido de *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov* 2(4) (1 966) 450-456.