

ENSAYOS DE PROGRESO DE GRIETA EN PROBETAS DE ALUMINIO DE ESPESOR DELGADO, CORRELACION CON MODELO MATEMATICO

F. Martín de la Escalera¹, J. García Martínez², F. Longo Gregorio³, Á. Salamanca García³

¹Aernnova Engineering Solutions Ibérica
(Anteriormente Gamesa Desarrollos Aeronáuticos)
Departamento de Integridad Estructural
Avd Manoteras nº 20
28050 Madrid, España
federico.martindelaescalera@aernnova.com
Tfno: +34 917280898 Fax: +34 917280904

²Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Área de Estructuras y Mecanismos
Carretera de Ajalvir km 4
Carretera de Ajalvir km 4 Torrejón de Ardoz.
28850 Madrid, España
garciamj@inta.es
Tel: +34 91 5201316 Fax: +34 91 5201367

³Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Área de Materiales Metálicos
Carretera de Ajalvir km 4 Torrejón de Ardoz.
28850 Madrid, España
longogf@inta.es
Tel: + 34 91 520 17 33 Fax: +34 91 520 15 92

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el contexto del trabajo presentado en el anterior congreso del Grupo Español de Fractura celebrado en Albarracín en Marzo del 2006, titulado “**Métodos computacionales aplicados a la predicción de resistencia residual de paneles de ala o fuselaje**” donde se mostró una implementación numérica, en un código comercial de elementos finitos, de un criterio de fractura basado en el CTOA, que permite analizar la propagación de fisuras y la resistencia de paneles delgados, donde los efectos de plasticidad son importantes. Con este criterio, se ha estudiado numéricamente la propagación de fisuras y la resistencia residual de diferentes probetas de paneles de pequeño espesor, cuyo comportamiento experimental está reportado en la literatura.

El trabajo resume los resultados obtenidos a partir de la explotación de la metodología y el modelo matemático propuesto. En este sentido se presenta una descripción tanto de los modelos de elementos finitos como del algoritmo de propagación de grieta. Se está desarrollando una campaña de ensayos con el fin de evaluar el parámetro CTOA, Crack Tip Opening Angle, en probetas compactas C(T). Los materiales ensayados son aleaciones de aluminio utilizadas en estructuras o componentes estructurales de un avión. La aleación investigada es aluminio del tipo 2024-T3 sheet-bare (espesor de 0.063”). Se presentan correlaciones entre los resultados numéricos y experimentales. Finalmente se expone la metodología de ensayo utilizada.

ABSTRACT

This paper is focused in the work presented in the last congress of the Spanish Fracture Group, which took place in Albarracín in March 2006, with the title ‘Computational methods for the prediction of residual strength for skin or fuselage panels’ where was shown a numerical development, leant on a commercial finite element code, of a fracture criterion based on CTOA. This allows analyzing cracks growth and thin panels strength, where plasticity effects should be taken into account. Cracks growth and residual strength of different thin panels test specimens can be numerically studied and compared with the experimental results found in different works.

This work summarizes the results obtained using this mathematical model. It is shown a description of the finite element model and the crack growth algorithm. A tests campaign is being undertaken in order to evaluate the CTOA parameter for compact specimens. The testing materials are aluminium alloys used in aircraft structures, such as 2024 T3 sheet bare aluminium alloy (0.063” thick). A correlation between numerical and test results is also shown.

Finally, the test methodology is explained.

ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS: Fractura de Materiales Compuestos o Aplicaciones Prácticas en Ingeniería.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Computacional, CTOA.

1 MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

La finalidad principal de este trabajo es analizar la viabilidad de MSC/NASTRAN para realizar predicciones de resistencia residual [1,2] en especímenes de pequeño tamaño, probetas C(T), y su posterior aplicación a modelos de estructuras complejas (paneles delgados de ala o fuselaje).

MSC/NASTRAN es un código comercial de elementos finitos de propósito general muy utilizado en la industria aeroespacial, no obstante empiezan a utilizarse otros códigos como pueden ser ABAQUS, SAMCEF, etc.

En cuanto a herramientas propias de Mecánica de Fractura incorporadas por MSC/NASTRAN, se puede decir que no es un código orientado a esta disciplina, ya que como se ha señalado anteriormente se trata de un código de propósito general. Únicamente incorpora dos elementos: uno en elasticidad bidimensional CRACK 2D y otro en elasticidad tridimensional CRACK 3D, los cuales incorporan técnicas de correlación del campo de desplazamiento [3] con el fin de estimar un valor de Stress Intensity Factor, K, dentro del ámbito de la Mecánica de Fractura Elástico Lineal. El aporte de MSC/NASTRAN en este ámbito es limitado.

La aproximación del problema de avance estable de grieta mediante MSC/NASTRAN se realiza simulando el crecimiento de la grieta mediante la técnica de Nodal Release [4]. El modelo constitutivo de material utilizado consiste en un modelo elastoplástico incorporado por MSC/NASTRAN. Para ello se ha introducido la curva de material correspondiente a las aleaciones de aluminio 2024-T3, 7475-T761 y 7475-T7351 respectivamente.

El procedimiento desde un punto de vista de cálculo (aproximación numérica) tal y como proponemos en este trabajo consiste, en primer lugar, en ajustar un valor de CTOAc [5] (Crack Tip Opening Angle) con un modelo (tamaño probeta) lo más representativo, sobre todo en el frente de grieta (modelo tridimensional). Evidentemente para ello es necesario disponer de curva de resistencia residual de una probeta y a su vez de una colección de valores CTOA medidos en el ensayo, a medida que la grieta avanza.

Una vez obtenido un valor de referencia de CTOA, entra en juego el modelo bidimensional. En la práctica el panel completo debe de idealizarse con elemento placa delgada (estado de tensiones plano). Este problema puede atacarse con un modelo tridimensional, pero no es práctico desde un punto de vista ingenieril (resultado-coste). Por ello es necesario ajustar la curva de resistencia residual con un modelo bidimensional introduciendo para ello el concepto de “plane strain core”.

Las figuras 2 y 3 muestran un detalle de la malla empleada tanto en 2 como en 3 dimensiones

correspondiente a una probeta C(T). Las dimensiones de las probetas están indicadas en la figura 1.

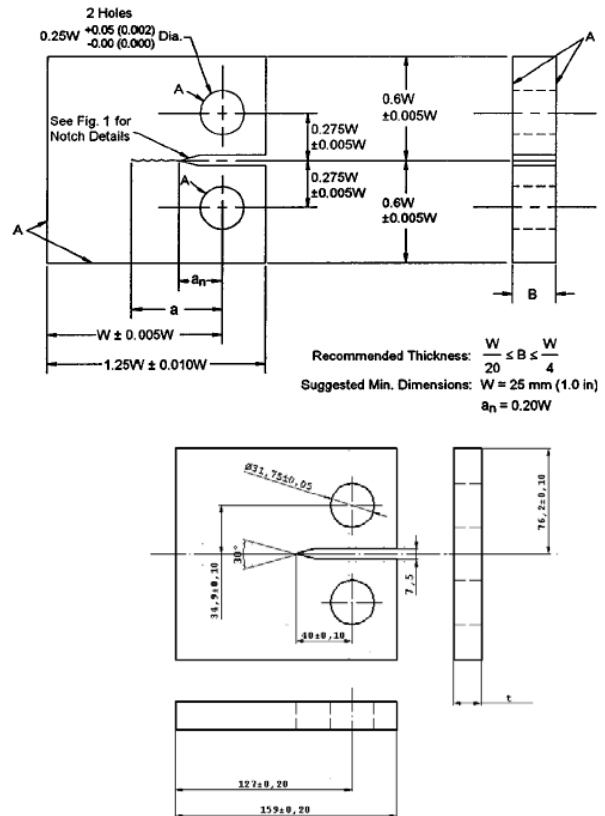


Figura 1. . Probeta C (T) utilizada en los modelos y ensayos (cotas en milímetros)

El paso de elemento para ambos modelos es de 1 mm. La topología de elemento utilizada en el modelo bidimensional es de elemento cuadrado de un nodo en cada vértice con cuatro puntos de integración. Cabe destacar que con el fin de evitar una sobre rigidez a cortante se ha utilizado la opción de corrección a comportamiento a flexión mediante una técnica de integración reducida.

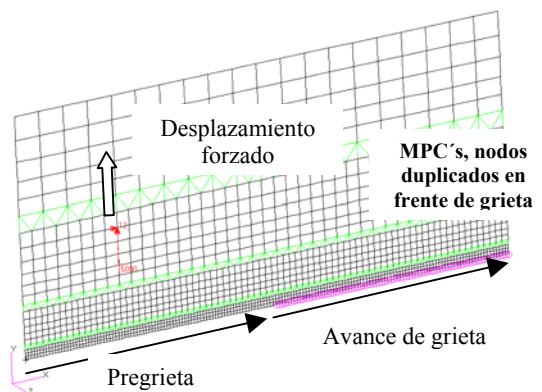


Figura 2. Modelo de Elementos Finitos bidimensional

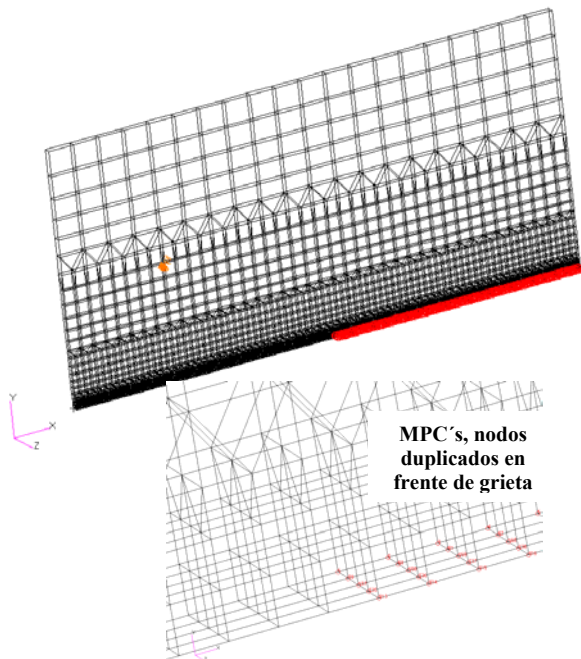


Figura 3. Modelo de Elementos Finitos tridimensional

Los modelos tridimensionales para ambas probetas han sido creados a partir de una extrusión de la malla bidimensional en el sentido normal al plano principal de la probeta. Los elementos utilizados en los estudios tridimensionales son elementos “bricks” de un nodo en cada vértice. La figura 4 indica el número de elementos empleados para ambos modelos en sentido normal al plano de la probeta.

En cuanto a la triaxialidad de tensiones alojadas en el las proximidades del extremo de fisura, cabe señalar que el modelo tridimensional planteado, con cuatro elementos a lo largo del espesor de la probeta, aproxima el estado triaxial de tensiones.

Suponiendo una placa fisurada de espesor B sometida a un estado de cargas en Modo I, ésta presenta el estado tensional que muestra la figura 4 (a) y (b). Si la placa no estuviera fisurada, ésta estaría sometida a un estado de tensión plana. Al estar fisurada se produce una elevada tensión normal al plano de la fisura que hace que el material del borde de grieta intente contraerse en dirección ‘ z ’, mientras que el material colindante trata de impedirse, generándose un estado triaxial de tensiones en el borde de la fisura.

Las figuras 4 (c), (d) y (e) muestran el estado tensional (σ_z y σ_y) en el borde de grieta en el modelo tridimensional planteado. Además se ha superpuesto la no deformada de la probeta. Como puede observarse, en zonas alejadas del fondo de fisura el material se deforma muy poco en dirección al espesor, este hecho restringe el desplazamiento hacia el interior del material, en zona cercana a la grieta, resultando por tanto un estado de deformación plana.

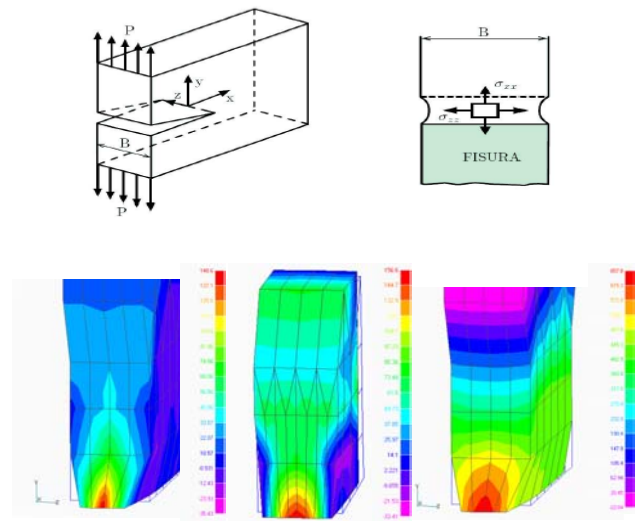


Figura 4. (a) Placa fisurada en modo I. (b) Estado tensional tridimensional en el borde de grieta. (c) Distribución de esfuerzos en dirección normal al espesor. (d) Distribución de esfuerzos en dirección normal al espesor para 8 elementos. (e) Distribución de esfuerzos en dirección de aplicación de la carga

2 PROCEDIMIENTO DE ANALISIS: “Gestor de Progreso de Grieta”

Con el fin de gestionar el progreso de grieta se ha creado un programa que interactúa con MSC/NASTRAN, cuyo esquema del algoritmo se muestra en la figura 5.

El programa admite varios tipos de modelos para el cálculo de la resistencia residual: probetas C(T) o probetas M(T), y modelos bidimensionales de elementos placas con el parámetro strain-core para el estado de deformación plana en las proximidades de la grieta, o modelos tridimensionales con elementos sólidos. Se han aprovechado las simetrías de las probetas para reducir el tiempo de cálculo: una simetría en la probeta C(T) y dos simetrías en la probeta M(T). Además para los análisis tridimensionales se puede considerar la simetría en el plano XY, ver figura 3.

El programa da como resultado la curva de resistencia residual del material, y es únicamente necesario por parte del usuario indicar el nombre del archivo de análisis del modelo y el tipo de modelo, C(T) ó M(T) y 2D ó 3D, además del parámetro de gobierno del progreso estable de grieta CTOAc. También se le puede introducir una longitud máxima de grieta para el caso de que se requiera la parada del programa.

La técnica empleada en el algoritmo se basa en el uso de la operación RESTART [6] que ofrece MSC/NASTRAN con la opción de actualización de la matriz de rigidez en cada paso de carga del análisis no

lineal. Con esta función se pueden hacer modificaciones al modelo en un paso intermedio de carga y continuar aumentando la carga desde dicho punto, simulando de ese modo la propagación de la grieta de manera adecuada mediante la “suelta de nodos” (Nodal Release). El programa ha sido diseñado especialmente para este problema y ahorra al usuario las modificaciones intermedias.

Tras indicar al programa el archivo, el programa ejecuta el análisis no lineal y abre el archivo de resultados. En dicho archivo de resultados busca los datos del primer paso de carga y comprueba el CTOA. Para ello se ha usado en el modelo una numeración de los nodos de la grieta que permite localizar el frente de grieta durante todo el proceso.

Si no se alcanza el CTOA crítico el programa busca el siguiente paso de carga y vuelve a comprobar el CTOA, y continúa de este modo sucesivamente. En caso de no alcanzar el CTOA crítico para ningún paso de la carga, se modifica el archivo de análisis para que la carga total sea mayor y se vuelve a ejecutar el análisis. En este paso se ha tenido especial cuidado de aumentar de forma discreta los pasos de aplicación de la carga (en términos de desplazamiento forzado) con el fin de no perder precisión en cuanto a la evaluación del ángulo de apertura de la grieta (CTOA), aunque conlleva más esfuerzo de cálculo.

En caso de alcanzar el CTOA crítico, el paso de carga para el que éste sucede es almacenado junto con la carga correspondiente. La longitud de grieta se calcula teniendo en cuenta el número de nodos “liberados” previamente, además de considerar la distancia entre los nodos del camino prefijado de la grieta (1 mm).

Para continuar el proceso de crecimiento de la grieta se crea un nuevo archivo de análisis con la operación RESTART. Para ello se “suelta el nodo” mediante la eliminación de una MPC [6] (Multi Point Constrains), lo que simula el crecimiento de la grieta y se indica el paso de carga a partir del cual se debe continuar el análisis.

El nuevo análisis es ejecutado y el programa repite el proceso a partir del paso de carga en el que se ha alcanzado el CTOA crítico en el análisis anterior.

El programa también es el encargado de crear la curva de resistencia residual, que es actualizada tras cada suelta de nodos.

Para el caso de modelos tridimensionales la diferencia principal es que no es necesario el parámetro “strain core” [7] y que el CTOA es calculado como la media de los ángulos que forman los elementos en el borde de la grieta en dirección transversal.

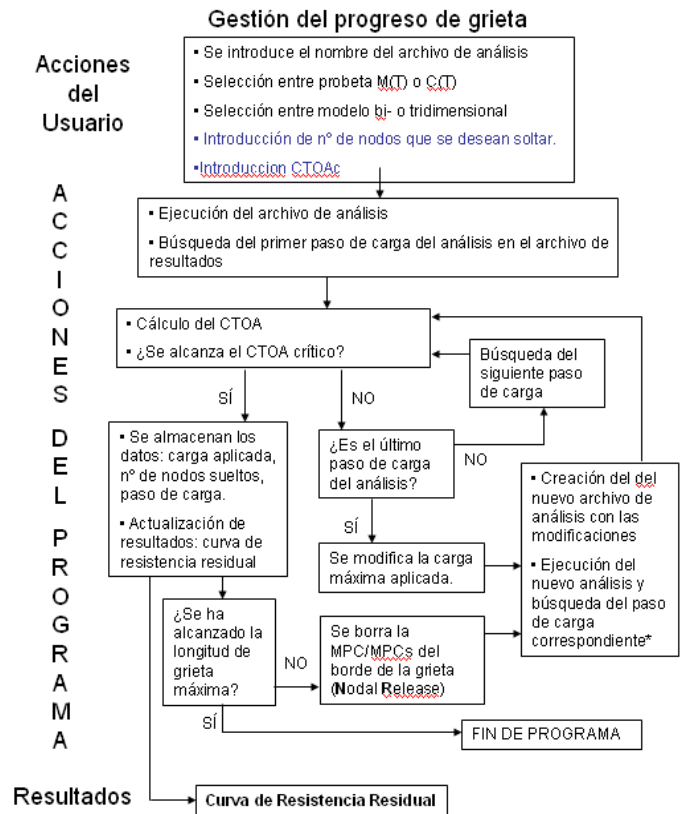
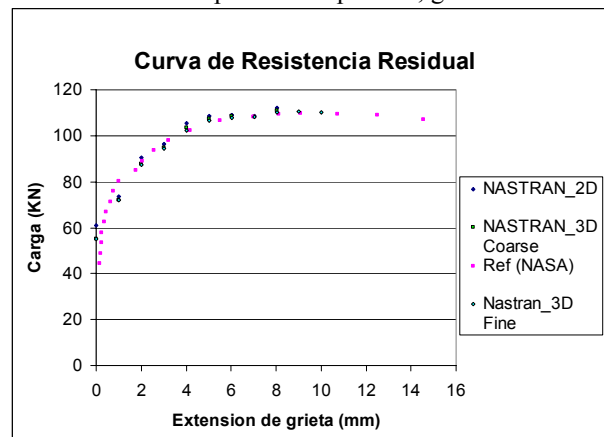


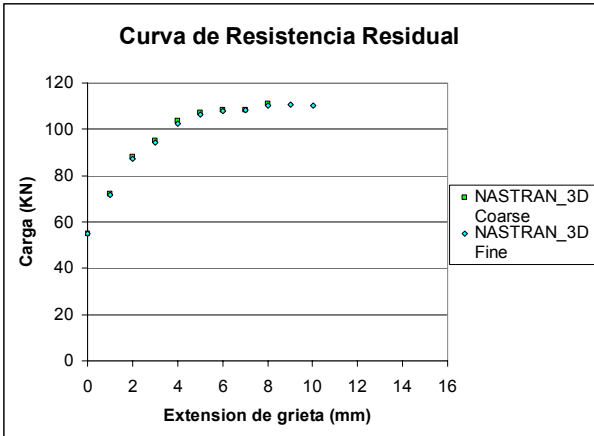
Figura 5. Diagrama de flujo del gestor de avance de grieta

3 RESULTADOS NUMERICOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta en el apartado anterior. En primer lugar se muestra una correlación, para probetas M(T) entre resultados de modelos 2D y 3D de curvas de resistencia residual y resultados de ensayos encontrados en literatura [8], gráfica 1. Además se ha considerado el hecho de una mayor discretización en dirección del espesor de la probeta, gráfica 2.



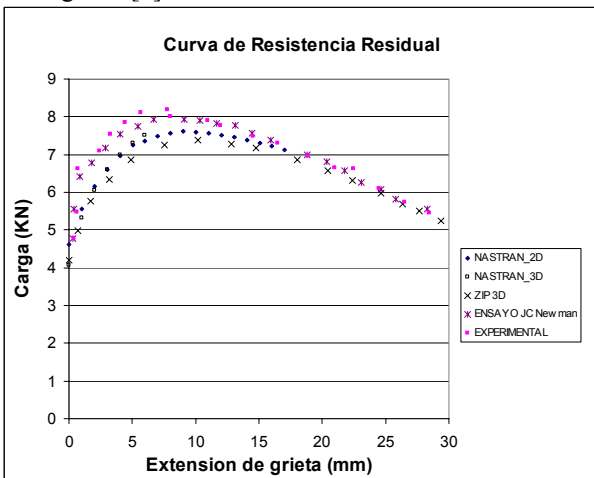
Gráfica 1. Correlación entre modelo matemático y datos de ensayos para probetas M(T)



Gráfica 2. Correlación entre los modelos tridimensionales teniendo en cuenta la discretización en dirección normal al plano de la probeta

En la gráfica 3 se presentan los resultados de la correlación del comportamiento del modelo de probeta compacta C(T) para la aleación de aluminio 2024-T3.

Se han considerado tanto los modelos bidimensionales y tridimensionales en código NASTRAN y resultados obtenidos mediante el código ZIP3D [7]. Los resultados de ensayos corresponden tanto a los obtenidos experimentalmente como a los reportados en bibliografía [8].



Gráfica 3. Correlación de obtención de curva de resistencia residual probetas C(T) de aluminio 2024 T3.

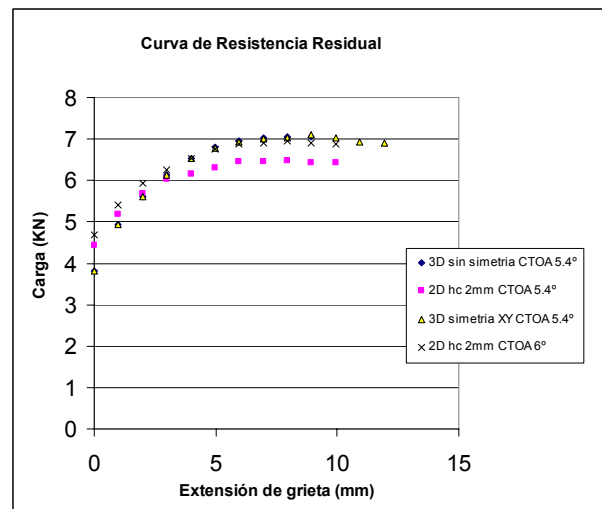
Como puede observarse en la gráfica anterior el comportamiento de las simulaciones tanto en NASTRAN como en ZIP3D es prácticamente el mismo, quedando algo por debajo la curva obtenida con ZIP3D. Trabajos realizados por otros autores han correlado resultados numéricos con ZIP3D y resultados de ensayos [7].

Por otro lado los datos de ensayos tanto los obtenidos de forma experimental como los reportados en la referencia [9], muestran, también, un comportamiento muy similar pero algo superior a las predicciones mediante modelo matemático.

Con el fin de estimar valores de CTOAc, a nuestro juicio, el procedimiento desde un punto de vista de cálculo (aproximación numérica) consiste, en primer lugar, en ajustar un valor de CTOAc con un modelo (tamaño probeta) lo más representativo, sobre todo en el frente de grieta (modelo tridimensional). Evidentemente para ello es necesario disponer de curva de resistencia residual de una probeta y a su vez de una colección de valores CTOA medidos en el ensayo, a medida que la grieta avanza.

Una vez obtenido un valor de referencia de CTOA, entra en juego el modelo bidimensional. En la práctica el panel completo debe de idealizarse con elemento placa delgada (estado de tensiones plano). Este problema puede atacarse con un modelo en elasticidad tridimensional, pero no es práctico desde un punto de vista ingenieril (resultado-coste). Por ello es necesario ajustar la curva de resistencia residual con un modelo bidimensional introduciendo para ello el concepto de “plane strain core”.

Se han utilizados los mismos valores de CTOA en los modelos bi y tridimensionales analizados con MSC/NASTRAN, los resultados obtenidos ofrecen resultados muy prometedores con el fin de abordar en un futuro la simulación del progreso de grieta en un panel completo. No obstante cabe señalar que en futuros estudios y junto con la disponibilidad de valores, obtenidos en ensayos, tanto de CTOAc como de curvas de resistencia residual de probetas, se realizara una correlación del comportamiento de los modelos bi y tridimensionales teniendo en cuenta la secuencia de cálculo indicada anteriormente. Los valores de CTOA del modelo bidimensional y tridimensional deberán estar en el mismo rango de valor, pero no tienen por que ser los mismos. La gráfica siguiente muestra la sensibilidad del valor del CTOAc en la respuesta del modelo bidimensional



Gráfica 4. Sensibilidad del comportamiento del modelo bidimensional según el parámetro CTOAc (5.4° y 6°).

4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales se están realizando sobre probetas compactas, figura 6, en el Laboratorio de Caracterización del Comportamiento Mecánico del Área de Materiales Metálicos del INTA, utilizando una máquina servohidráulica MTS de 100 kN, generando primeramente la grieta inicial por fatiga hasta conseguir una longitud inicial de grieta comprendida entre 0,35 W y 0,45 W (del orden de 50,8 mm); el preagrietamiento a fatiga se realiza según una carga sinusoidal de frecuencia 10 Hz, con una razón de cargas $R = 0,1$ manteniendo el valor máximo de la fuerza aplicada constante de tal forma que no se supere en el tramo final de la propagación un valor del factor de intensidad de tensiones (K) inferior al 50 % del valor de la tenacidad a la fractura del material (K_{IC}), pasando posteriormente a realizar el ensayo de resistencia residual a una velocidad constante del pistón entre 0,254 y 1,016 mm/minuto; durante esta etapa, de forma regularmente espaciada, se registran los valores de la fuerza aplicada, el tiempo y una imagen del desarrollo de la grieta que nos permite, tras el análisis de las imágenes, obtener los valores del ángulo de apertura en la punta de la grieta CTOA.

El ángulo de apertura en la punta de la grieta CTOA (*Crack Tip Opening Angle*) se medirá ópticamente utilizando imágenes digitales y tratándolas posteriormente. Todo el proceso de propagación de la grieta durante el ensayo de carga residual será recogido digitalmente a través de un sistema de visión artificial disponible en el Laboratorio de Caracterización del Comportamiento Mecánico del Área de Materiales Metálicos del INTA. El componente fundamental de este sistema de visión artificial es la cámara digital (Fig. 6) de alta resolución (3.288×2470 píxeles) e interfaz IEEE1394. Además de la cámara, se cuenta con una lente telecéntrica de alta precisión (lente 1× para abarcar un campo de visión de 8,8×6,6 mm (aproximadamente) y obtener una precisión de 8 μm), situada en una plataforma motorizada de alta resolución con interfaz RS-232 para mover la cámara y equipada con un sistema de iluminación especial para obtener el adecuado contraste entre la grieta generada y la probeta. Un sistema informático se encarga del control del sistema y posterior tratamiento de todos los datos de ensayo. Este sistema incorpora una tarjeta de adquisición de datos capaz de adquirir señales analógicas procedentes de la máquina de ensayo (señal de carga), extensómetros (señal de desplazamiento), etc. Todas estas señales las procesa el sistema de forma que sincroniza para cada instante de tiempo t todas estas señales analógicas y la imagen digital, figura 7.

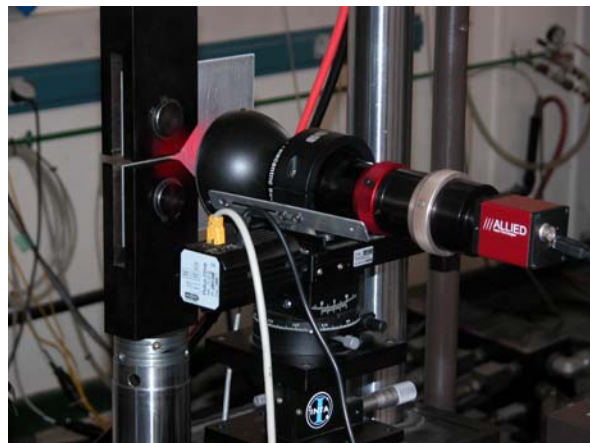


Figura 6. Fotografía del equipamiento de ensayo y toma de imágenes



Figura 7. Imagen del avance de la grieta por carga estática en un instante t

5 CONCLUSIONES

1. Se ha presentado una propuesta de metodología de obtención de curvas de resistencia residual mediante el código comercial MSC/NASTRAN.
2. Las correlaciones obtenidas entre el comportamiento de los modelos matemático y resultado de ensayos, son satisfactorias. Incluso comparándolas con soluciones numéricas de otras fuentes (ZIP3D).
3. El comportamiento del modelo bidimensional, con "plain strain core" simula el estado triaxial de tensiones en el borde de grieta reproducido por el modelo tridimensional.
4. Se propone una metodología de ajuste del parámetro CTOA con modelo tridimensional y una posterior correlación con modelo bidimensional.
5. Se propone un procedimiento de ensayos con el fin de evaluar el parámetro CTOA

6 REFERENCIAS

- [1] F. Martín de la Escalera, E. Mirón, S. Santos, J. Fernández Sáez “*Métodos Computacionales Aplicados a la Resistencia Residual de Paneles de Ala o Fuselaje*”, Anales de Mecánica de Fractura Vol. I (2006), pp 293-303
- [2] F. Martín de la Escalera, S. Santos, “*Obtención de curvas de resistencia residual en probetas $M(T)$ y $C(T)$ mediante criterio de CTOA*”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y diseño en Ingeniería*” Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE” Vol. 23 nº1 (2007)
- [3] Anderson, T.L. “*Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*”, CRC Press, EE.UU., 1995
- [4] Franc2D/L: A Crack propagation Simulator for Plane Layered Structures Version 1.5. User’s Guide. Erin Lesulauro. Cornell University. Ithaca, New York
- [5] J.C. Newman Jr, M.A. James, U. Zerbst, “*A Review of the CTOA/CTOD Fracture Criterion*”, *Engineering Fracture Mechanics* 70, 2003, pp 371-385
- [6] MSC NASTRAN 2004 Reference Manual. MSC Software Corporation
- [7] B.R. Seshadri, M.A. James, R.D. Young, J.C. Newman. “*Recent Developments in the Analysis of Monolithic Structures at NASA Langley*”, The sixth Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference. San Francisco, California. 2002
- [8] William M. Johnston, “*Fracture Tests on Thin Sheet 2024-T3 Aluminum Alloy for Specimens With and Without Anti-Buckling Guides*”, NASA/CR-2001-210832, 2001.
- [9] D.S. Dawicke, J.C. Newman Jr, J.H. Starnes, C.A. Rose, R.D. Young, B.R. Seshadri “*Residual Strength Analysis Methodology: Laboratory Coupons to Structural Components*”, NASA Langley Research Center, 1999