

APLICACIÓN DE CRITERIOS DE FRACTURA PARA EL CÁLCULO DE COMPONENTES CERÁMICOS**M.D. Rubio*, C. J. Crespo*, R. Jakel*, P. Dietz* y A. Vilellas*******Institut für Maschinewesen.(T.U. Clausthal).****Robert Koch Str. 38678 Clausthal-Zellerfeld. Alemania******Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica.****Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna 3, 50015 Zaragoza.**

Resumen. Se parte de un programa desarrollado por R. Jakel que trabajando como un postprocesador de un programa de elementos finitos comercial, podía calcular, basándose en criterios generales, la probabilidad de supervivencia de piezas de un material cerámico, según el estado de sollicitaciones al que estuviera sometido. A partir de este punto se han desarrollado subrutinas para dicho programa de forma que permiten analizar la probabilidad de vida de las piezas según criterios de mecánica de fractura (once criterios diferentes para puntos de integración en elementos de volumen y seis para puntos en elementos de superficie). Así mismo, se han implementado dichos criterios en el caso de que se quisieran realizar cálculos con carga aplicada durante intervalos de tiempo, y en el cálculo de factores de seguridad.

Abstract. R. Jakel developed a computer program as a postprocessor of a commercial F.E.M. program. It could calculate, through fracture general criteria, the probability of survival of ceramic components, depending on the load state applied on it. From this point, several subroutines were developed for this program, in order to calculate the probability of failure of ceramic components through fracture mechanic's criteria (eleven different criteria for integration points belonging to volume elements and six for points belonging to surface elements). Those criteria have been implemented also to calculate the probability of survival with applied loads during time intervals and to calculate security factors.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos presentan en la actualidad una serie de propiedades específicas que potencian su interés tecnológico. Estas se pueden resumir en una elevada dureza, una resistencia a altas temperaturas y ambientes corrosivos y abrasivos, mucho mayor que la que presentan en la actualidad metales de altas prestaciones, así como una densidad mucho más baja que estos, lo que permitiría un ahorro de costes energéticos.

Sin embargo estos materiales cerámicos han presentado también serios inconvenientes en sus aplicaciones técnicas debido a su elevada fragilidad. Este carácter frágil se debe a la propia conformación de las piezas en este material a partir de polvos cerámicos, ya que aparece una distribución de grietas microscópicas y defectos a lo largo del volumen de la pieza, así mismo, los procesos de tratamiento superficial inducen una serie de grietas en la superficie, que permiten afirmar la existencia de una

distribución de defectos en esta completamente independiente de la que caracteriza al volumen del componente. Son estos defectos los que producen un efecto de intensificación sobre el campo de esfuerzos que sufre el material. El crecimiento catastrófico de alguna de estas grietas es el causante de la rotura de la pieza, y por tanto del comportamiento frágil de los materiales cerámicos.

Al querer analizar el comportamiento de las cerámicas, es necesario tener en cuenta una serie de factores, de los que se puede prescindir cuando se están estudiando materiales dúctiles. Así como en los metales es necesario únicamente analizar la resistencia del material en aquellos puntos en los que el estado de tensiones sea más crítico, cuando se trabaja con materiales cerámicos se pueden tener zonas de la pieza más críticas ante un estado de tensiones dado que otras donde, sin embargo las tensiones sean mayores. Esto es debido a que aunque el estado de tensiones al que esta sometido sea mayor en la primera, es en la segunda región en la que la

distribución de defectos es en tal grado mayor, que se produce primero el fallo en ella. Así es importante tener en cuenta todo el volumen de la pieza cuando se analizan cerámicas, así como emplear un punto de vista probabilístico para su estudio, en el que todas las partes de la pieza contribuyen a la probabilidad de supervivencia, y una distribución de grietas cuyo tamaño y orientación se han de tratar también desde el punto de vista probabilista. Es muy importante aquí destacar la utilización del concepto de 'la unión más débil' que es el que más se ajusta a los resultados experimentales, de forma que según este concepto la pieza fallará en el instante en que alguna de sus grietas rompa de manera catastrófica, al igual que una cadena rompe cuando lo hace cualquiera de sus eslabones.

Fue Weibull [1] el primero que planteó un tratamiento probabilista para este tipo de materiales frágiles. Partiendo de una serie de ensayos realizados con probetas sometidas a carga uniaxial, llegó a unas curvas tensión-probabilidad de fallo que representadas en escala doblemente logarítmica, en probabilidades, se ajustaban a una serie de líneas rectas, lo cual le permitió plantear una función de probabilidad de tipo exponencial en el que se definían una serie de propiedades características de cada material cerámico.

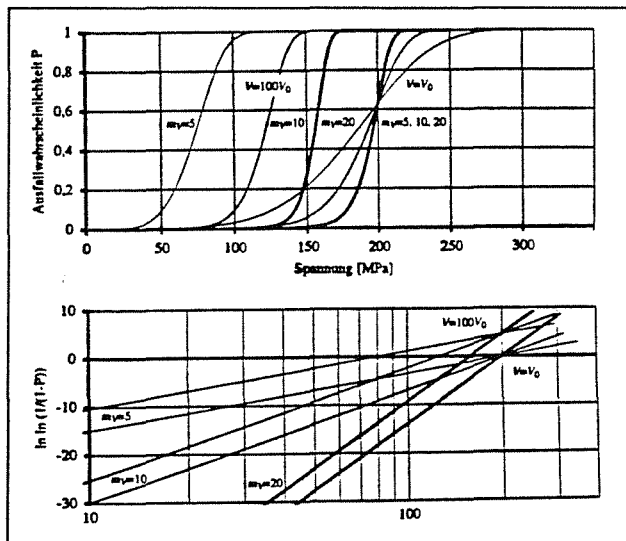


Fig. 1. Curvas de probabilidad de fallo para diferentes materiales cerámicos, y su representación en escala logarítmica.

La expresión aplicable a la probabilidad de fractura de una probeta de volumen V_0 es por lo tanto:

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{1}{V_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad [1]$$

Que expresado en dobles logaritmos de la probabilidad de fallo permitían encontrar sobre la curva de forma directa los parámetros característicos del material:

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - P_f} \right] = m_V \ln(\sigma - \sigma_{uv}) + \ln \frac{V}{V_0} - m_V \ln \sigma_{0V} \quad [2]$$

Esta expresión fue desarrollada por Weibull para estados de carga uniaxial, considerando que el material solo podía fallar sometido a estados de tracción, fue él mismo el que planteó la posibilidad de extrapolar estos resultados para estados de carga multiaxial, evaluando una tensión normal media en cada subvolumen de la pieza y aplicándole un tratamiento análogo al desarrollado anteriormente. Este método, aunque intuitivamente lógico carecía de una base teórica suficiente como para poder ser aceptado como generalización.

Tampoco tienen una justificación teórica los métodos presentados posteriormente por:

Pia: Según el cual el estado de tensiones multiaxial, produce un efecto análogo en el riesgo de fractura a considerar estas tensiones como actuando de forma independiente.

$$\sigma_{VeqPIA} = \sqrt[m_V]{\sigma_1^{m_V} + \sigma_2^{m_V} + \sigma_3^{m_V}} \quad \text{con } \sigma_i > 0 \quad [3]$$

Weibull - Stanley: Enuncia una teoría buscando un factor de equivalencia de efectos entre las aportaciones de tensiones de tracción y compresión actuantes en un punto de la pieza.

$$P_{fms}(\sigma) = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{V_0 \sigma_{0V}^m} \int \left[\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_u}{H(\sigma_1)} \right)^m + \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_u}{H(\sigma_2)} \right)^m + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_u}{H(\sigma_3)} \right)^m \right] dV \right\} \quad [4]$$

Beierlein: El cual considera que las tensiones que actúan sobre la pieza son producidas por las tensiones de deformación.

$$P_{fBe} = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{V_0 \cdot \sigma_{0V}^m} \int (\sigma_{1Be}^{m_V} + \sigma_{2Be}^{m_V} + \sigma_{3Be}^{m_V}) dV \right\} \quad [5]$$

Englobados todos ellos dentro de lo que se pueden llamar métodos generales, que buscan encontrar una descripción del comportamiento del material, desarrollan variaciones de la expresión de Weibull para explicar comportamientos a compresión y ante estados de carga multiaxial, sin presentar una justificación teórica a este comportamiento.

Estos métodos obvian por completo la justificación del comportamiento frágil de las cerámicas debido a las grietas que lo producen, esto conlleva una omisión de la influencia de las tensiones de cortadura tan importantes al justificar la fractura de

grietas. R. Jakel [2], planteó un criterio de carácter general en el que se engloba este efecto dentro de una expresión de tensión equivalente (1996), intentando reflejar las conclusiones obtenidas por medio de las teorías de la mecánica de fractura, pero buscando evitar la laboriosidad que sus teorías conllevan:

$$\sigma_{m-f} = \sqrt[n]{K_{m-f} [\sigma_{re1}^n + \sigma_{re2}^n + \sigma_{re3}^n + k_1(\sigma_{m12})\sigma_{re1}^n + k_1(\sigma_{m23})\sigma_{re2}^n + k_1(\sigma_{m13})\sigma_{re3}^n]} \quad [6]$$

Son las teorías de mecánica de fractura la que proporcionan una base adecuada para el estudio justificado de la probabilidad de fallo en materiales frágiles.

Según estas teorías la probabilidad de supervivencia de un componente cerámico, no es más que el producto de las probabilidades de supervivencia de todos los diferenciales de volumen de los que esta compuesto:

$$P_{sV} = \left(1 - \Delta P_{fvi}\right)^n \cong \prod_1^n e^{-\Delta P_{fvi}} = e^{-\sum_1^n \Delta P_{fvi}} = e^{-R_f} \quad [7]$$

fórmula análoga a la que enunció Weibull a través de su trabajo.

Es la distribución de grietas en el material, tanto las embebidas en el volumen como en su superficie, la causante tanto del comportamiento frágil como de la dispersión del valor de resistencia a la fractura.

Así, se da en cada diferencial del volumen (o de superficie) una densidad de grietas $N(\sigma_{cr})$ determinada por la tensión crítica a la que estas fallan (σ_{cr}).

Esto permite definir el riesgo de fractura en cada dV o dS para un estado de tensiones dado, (Σ) como el producto de dos términos de probabilidad;

$$\Delta P_f(\Sigma, \sigma_{cr}, \Delta V) = \Delta P_{f1} \cdot P_{f2} \quad [8]$$

Si se trabaja en un dV , el valor de ΔP_{f1} es;

$$\Delta P_{f1} = \Delta V \frac{dN(\sigma_{cr})}{d\sigma_{cr}} d\sigma_{cr} \quad [9]$$

Es decir este término presenta la probabilidad de que en este dV (o dS) se encuentre una grieta de tensión crítica comprendida entre σ_{cr} y $\sigma_{cr} + d\sigma_{cr}$.

Debido a que la resistencia de las grietas esta directamente relacionada con la longitud de estas, este término da una medida implícita de las dimensiones de la grieta, de forma que no será necesario que aparezca el valor de longitud de grieta de forma explícita.

El segundo término se define como la probabilidad de que una grieta se encuentre orientada en este dV o

dS , de forma que el estado de tensiones (Σ) aplicado en el diferencial esté produciendo una $\sigma_{eq} \geq \sigma_{cr}$ en la orientación en la que se encuentra la grieta. Se definirá para un dV como:

$$P_{\Omega} = \frac{\Omega(\Sigma, \sigma_{cr})}{4\pi} \quad [10]$$

Apareciendo en la expresión el área del ángulo sólido como área en la que $\sigma_{eq} \geq \sigma_{cr}$ dividida por todo el área de la esfera (4π).

Así pues la expresión de la P_f de un dV_i de material cerámico es:

$$P_{fi} = 1 - e^{-\Delta V_i \cdot \int_0^{\sigma_{max}} \frac{\Omega(\Sigma, \sigma_{cr})}{4\pi} \frac{dN_v(\sigma_{cr})}{d\sigma_{cr}} d\sigma_{cr}} \quad [11]$$

Tal y como se ha planteado hasta el momento en las teorías de mecánica de fractura, en cada dV (todo el razonamiento desarrollado es análogo para dS) será necesario realizar una integral que depende del estado de tensiones al que está sometido. Esto demuestra claramente la dificultad de realizar este tipo de cálculos propuestos para el cálculo de la probabilidad de fractura asociada a cada punto de integración. Aún así la Nemeth [3] presentó un programa de elementos finitos, llamado CARES, que realizaba este tipo de integrales.

Fue Thiemier [4], el que propuso un método para cambiar los límites de esta integral ($0 - \sigma_{eq \text{ máx}}$). Por lo cual la probabilidad de fallo de un volumen dado es:

$$P_f = 1 - e^{-\int_V \left[\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} N(\sigma_{eq}) \sin \alpha \cdot d\beta \cdot d\alpha \right] dV} \quad [12]$$

Mientras que para calcular la probabilidad de fallo de una superficie, se utilizará la expresión:

$$P_f = 1 - e^{-\int_S \left[\int_0^{2\pi} N(\sigma_{eq}) d\alpha \right] dS} \quad [13]$$

Las expresiones de $N(\sigma_{eq})$ que las diferentes teorías de mecánica de fractura han ido planteando, tanto para criterios de volumen como de superficie son de este tipo:

$$N(\sigma_{cr}) = K_{eq} \cdot \sigma_{cr}^m \quad [14]$$

Las diferentes teorías de mecánica de fractura que han sido implementadas son las siguientes:

Criterio de Griffith de tensiones máximas, para cálculos en volumen:

Grieta Griffith: $\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + \tau_{eff}^2} \right)$ [15]

Grieta Penny Shaped :

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + \left(\frac{2}{2-\nu} \tau_{eff} \right)^2} \right) \quad [16]$$

Criterio de la velocidad de energía coplanar de deformación.

Grieta Griffith tanto para volumen como superficie:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_n^2 + \tau_{eff}^2} \quad [17]$$

Grieta Penny Shaped, sólo en cálculos en volumen:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_n^2 + \left(\frac{2\tau_{eff}}{2-\nu} \right)^2} \quad [18]$$

Grietas tipo Griffith Notch en cálculos de superficie:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_n^2 + \left(\frac{0.7951}{1-\nu} \right) \tau_{eff}^2} \quad [19]$$

Criterio de Shetty.

Grietas Griffith para volumen y superficie:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + (2\alpha\tau_{eff})^2} \right) \quad [20]$$

Grietas Penny Shaped, para volumen:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + \left(\frac{4\alpha}{2-\nu} \tau_{eff} \right)^2} \right) \quad [21]$$

Grieta de tipo Griffith Notch para superficie:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + 3.1803(\alpha\tau_{eff})^2} \right) \quad [22]$$

Grieta semicirculares para superficie:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + 3.301(\alpha\tau_{eff})^2} \right) \quad [23]$$

Criterio empírico, solo para cálculos en volumen.

Grieta Griffith: $\sigma_{eq} = \sqrt[2]{\sigma_n^2 + (\alpha\tau_{eff})^2}$ [24]

Grieta Penny Shaped:

$$\sigma_{eq} = \sqrt[2]{\sigma_n^2 + \left(\frac{2\alpha}{2-\nu} \tau_{eff} \right)^2} \quad [25]$$

Criterio de sensibilidad al cortante.

Grieta Griffith:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\tau_{eff} + \sqrt{4\sigma_n^2 + (\alpha\tau_{eff})^2} \right) \quad [26]$$

Grieta Penny Shaped :

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\tau_{eff} + \sqrt{4\sigma_n^2 + \left(\frac{2\alpha}{2-\nu} \tau_{eff} \right)^2} \right) \quad [27]$$

2. PROGRAMA WEIBULLNEU.

En la aplicación de estas teorías al cálculo industrial de componentes cerámicos, es patente la elevada dificultad de aplicarlas sin hacerlo a través del cálculo computacional. Es por esto por lo que se planteó el uso de programas de elementos finitos para poder, partiendo de los cálculos de tensiones que estos proporcionan, aplicar estas teorías en cada punto de integración, y así poder calcular probabilidades de fallo.

El I.M.W (Institut für Maschinenwesen), se planteó el uso de un programa de elementos finitos, MARC, que ofrecía la flexibilidad suficiente como para permitir al usuario el acceder en cada punto de integración a los resultados ya calculados, como las tensiones, y realizar los cálculos que le interesasen. De esta forma se desarrolló inicialmente un conjunto de subrutinas de MARC, empleadas para el cálculo probabilístico de materiales identificados como cerámicos, y se le llamó WEIBULL, en honor a este, permitiendo realizar cálculos de probabilidad según los tres primeros criterios generales presentados en este artículo. Fue posteriormente se amplió la capacidad del programa, para que se aumentasen las posibilidades de cálculo con los criterios de Mecánica de Fractura tanto para volumen como para superficie, así como con el criterio de carácter general desarrollado por Jakel. A esta nueva versión del programa se le llamó WEIBULLNEU.

El programa MARC dispone de una serie de subrutinas, de las cuales puede disponer el usuario para realizar aquellos cálculos que le interesen. Es una de estas, la subrutina PLOTV, la que se emplea en el programa WEIBULLNEU, para calcular en cada punto de integración las variables escogidas por el usuario. Además de ello, para

realizar la lectura de datos necesarios para los cálculos, propios de materiales cerámicos, y por lo tanto específicos para este tipo de cálculos, WEIBULLNEU emplea la subrutina USDATA, para poder almacenar los datos colocados en la opción del mismo nombre, en el fichero de lectura de datos. *.dat.

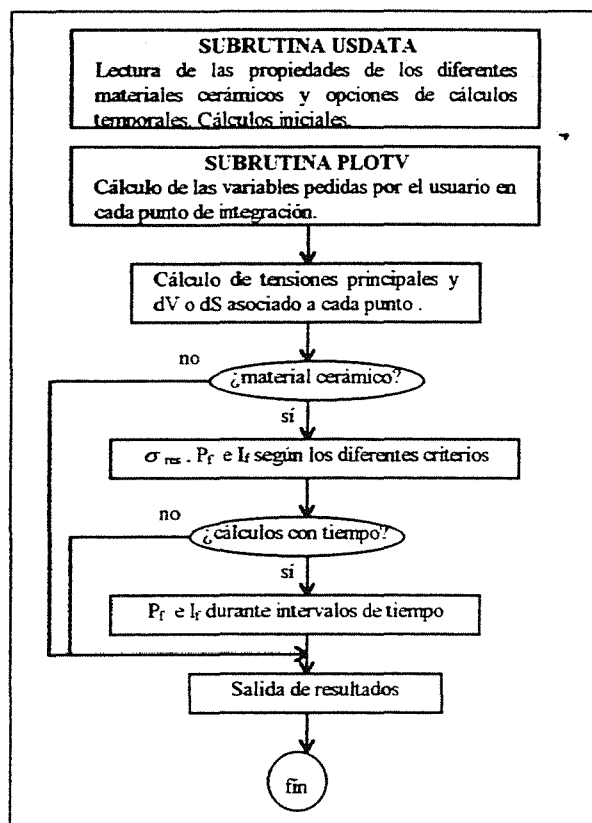


Fig. 2 Algoritmo de funcionamiento del programa WEIBULLNEU

El plantear cálculos de Mecánica de fractura obligó a realizar en cada punto de integración, no solo una evaluación de la tensión equivalente planteada por el criterio, sino también tener que realizar integrales de en la esfera de orientaciones, para cálculos en volumen y en la circunferencia de radio unidad para cálculos en superficie.

El cálculo de las tensiones principales y el volumen asociado a cada punto de integración se realiza porque se detectó un fallo en su cálculo por el programa para casos de geometría cilíndrica.

3.RESULTADOS

El programa WEIBULLNEU es capaz de, en un caso planteado para su análisis de elementos finitos, calcular para cada punto de integración de cada elemento el estado de tensiones principales al que está sometido, así como el volumen o superficie asociado a cada punto de integración. Además es

capaz de reconocer si el elemento es de tipo volumétrico o superficial y si el material asociado al elemento es de carácter cerámico o no, en caso de que lo sea realizará cálculos para encontrar la tensión resultante según los cuatro criterios generales vistos, así como según uno de los criterios de mecánica de fractura escogido por el usuario (y que puede ser diferente según el elemento sea de volumen o superficie).

Calculada la tensión resultante en cada punto de integración se puede calcular la P_f de carácter instantáneo asociada a ese punto, así como la P_f cuando la carga se aplica en vez de forma instantánea durante un intervalo de tiempo, por medio de la expresión desarrollada por Nadler[5] y cuando esta carga va variando durante diferentes intervalos de tiempo. Así se presentan mapas de tensiones resultantes, probabilidades de fallo e intensidades de fallo para ambos tipos de cargas, siendo necesario diferenciar cuando los cálculos se realizan para elementos de volumen como de superficie, ya sea porque los criterios aplicados sean diferentes como porque las propiedades del material varían.

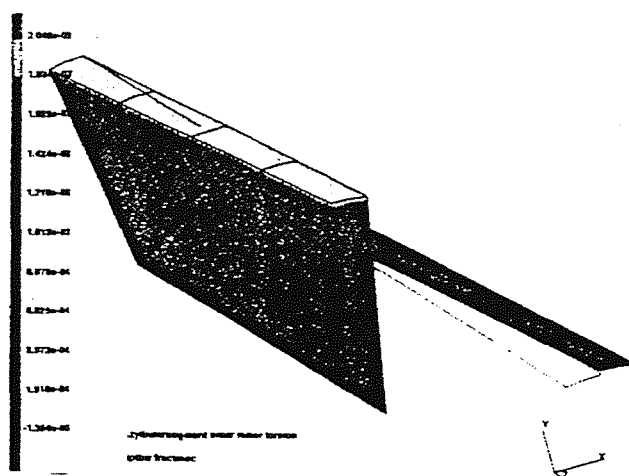


Fig. 3 Cálculo de probabilidad de fallo de un cilindro a torsión según un criterio de mecánica de fractura

Es importante localizar no solo aquellas zonas que más contribuyen a la probabilidad de fallo de toda la pieza, sino también la probabilidad de fallo total de toda la pieza. Esto es calculado también por el programa a través de las expresiones:

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{V_0 \sigma_0^m} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^k I_{sub,j} (\sigma_{res} - \sigma_u)^m \right] \right\} \quad [28]$$

para cálculos estáticos.

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{V \sigma_0^m} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^k V_{sub ij} \left[\sum_{l=1}^m (\sigma_{ij} - \sigma_u)^{m/\mu} t_l \right]^\mu \right] \right\} \quad [29]$$

para cálculos de cargas aplicadas durante intervalos de tiempo.

También es posible calcular, para una probabilidad de fallo límite dada por el usuario, cual es el valor del factor de seguridad resultante, una vez detectado el valor de tensión máxima para cada material de la pieza, a lo largo de su cálculo, tanto para cargas instantáneas como para cargas aplicadas durante intervalos de tiempo:

$$\sigma_{lim} = \sqrt[m]{\frac{V_0 \sigma_0^m}{V \cdot I \cdot \ln(1 - P_{f_{lim}})}} \quad [30]$$

$$s = \sigma_{lim} / \sigma_{max} \quad (s: \text{factor de seguridad}) \quad [31]$$

De esta forma el usuario dispone de una serie de resultados que le pueden ser muy útiles, ya que no solo le indican la probabilidad de fallo resultante en la pieza, sino también muestran posibles métodos de disminución de esta (C. Crespo[6])

4. DISCUSIÓN Y RESUMEN

El diseño de materiales frágiles, tales como cerámicas, conlleva la aplicación de metodologías de diseño diferentes a las empleadas con materiales dúctiles, que reflejen los diferentes aspectos inherentes a estos materiales, tales como la distribución aleatoria de grietas en su interior, de tamaño también aleatorio, lo que obliga a la consideración de todo el volumen de la pieza en el cálculo de su probabilidad de fractura, y no solo de las zonas de tensión máxima.

La necesidad de tener en cuenta la totalidad del volumen y su estado tensional en el cálculo de probabilidades, hace muy importante el uso de programas de elementos finitos que permitan acceder a esta información en diferenciales de volumen o superficie lo suficientemente pequeños como para que se puedan considerar en ellos un estado tensional constante.

Además la aplicación de las diferentes teorías, permite comparar los resultados probabilísticos obtenidos con criterios generales, con los de criterios de mecánica de fractura, con una base teórica mucho más sólida. Ante estados de tensión de tracción las diferencias entre ellas apenas son cuantitativas, mientras que en estados de tracción-compresión las diferencias son más notables (excepto para el criterio

de Mohr-Pia ya diseñado para ajustarse mejor a los resultados de la mecánica de fractura), y para estados de tensión de tipo compresión las diferencias entre ambos tipos de criterios todavía son mayores (exceptuando de nuevo al criterio de Mohr-Pia).

Los resultados experimentales hasta el momento no permiten destacar alguno de los criterios de mecánica de fractura como el más apropiado, sino que según sea el rango de tensiones los resultados se acercan más a uno u otro criterio. Aunque los criterios de carácter general divergen de los de mecánica de fractura de forma cuantitativa, su simplicidad hacen que su uso sea interesante.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Weibull, W.: A Statistical Theory of the Strength of Materials; Proceedings of the Royal Swedish Institute of Engineering Research Nr. 151 (1939), 5-41
- [2] Jakel, R.: Programm WEIBULL.-Ein Subprozessor zur Abschätzung der Sofort- und Zeitausfallwahrscheinlichkeit keramischer Bauteile für das Finite-Elemente-Programm MARC, Theorie und Bedienungsanleitung; Handbuch IMW TU Clausthal, (Sept. 1994).
- [2] Jakel, R.: Ein Betrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Hei β gasventilatorrades. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. IMW TU Clausthal, (Juli 1996).
- [3] Nemeth, N.N.; Manderscheid, J.M.; Gyekenyesi, J.P.: Ceramics Analysis and Reliability Evaluation of Structures (CARES), Users and Programmers Manual; NASA Technical Paper 2916, (August 1990)
- [4] Thiemier, Th.: Brückner-Foit, A.; Kölker, H.: Influence of the Fracture Criterion on the Failure Prediction of Ceramics Loaded in Biaxial Flexure, J. Am Ceram. Soc. Vol. 74, No. 1 (1991), 48-52
- [5] Nadler, P.: Beitrag zur Charakterisierung und Berücksichtigung des spezifischen keramischen Festigkeitsverhaltens; Diss. Bergakademie Freiberg (1989)
- [6] Crespo, C: Predicción de vida y optimización de componentes cerámicos; Proyecto final de carrera, (Diciembre 1996).