

DETERMINACION ANALITICA Y EXPERIMENTAL DE LA CURVA J_R UTILIZANDO PROBETAS NORMALIZADAS Y RECONSTRUIDAS

J.A. Alvarez, I. Gorrochategui, F. Gutiérrez-Solana, L. Van Wulpen

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria

Resumen. El objeto de este trabajo es simplificar el análisis de la viabilidad del empleo de distintos métodos analíticos para la caracterización frente a fractura de dos aceros al carbono diferentes, constituyentes habituales de vasijas a presión. Así, los resultados obtenidos a través de los métodos analíticos se comparan a los obtenidos a través de procesos experimentales normalizados.

Este trabajo se enmarca en un proyecto de mayor alcance cuyo objetivo final es el desarrollo de un procedimiento que permita la caracterización de las propiedades en fractura de aceros constituyentes de vasijas a presión a partir de material escaso mediante la construcción de probetas compuestas. Dada la gran cantidad de ensayos que requiere este programa, el desarrollo de métodos que simplifiquen su ejecución supone ventajas importantes.

Finalmente, los resultados aquí presentados permiten avanzar las primeras conclusiones sobre la validez de las probetas compuestas para determinar las propiedades en fractura de los materiales estudiados.

Abstract. The objective of the work presented in this paper is to analyze the possibility of using different analytical methods in order to simplify the experimental fracture toughness testing of two carbon steels typical constituents of pressure vessels. Thus, the results obtained making use of the analytical procedures are compared to the experimental ones obtained through standard procedures.

This work is part of a higher scope project whose final objective is the development of a procedure for determining the fracture properties of pressure vessel steels when little material is available through compound specimens reconstitution. This project require a high number of testing, therefore the simplification of the testing process involves significant advantages.

Finally, the results here presented allow to anticipate preliminary conclusions in regard to the validity of compound specimens testing for determining the fracture properties of the studied materials.

1. INTRODUCCION

Uno de los componentes de mayor responsabilidad de las centrales nucleares es la vasija de presión donde se alojan los elementos combustibles durante la operación de la planta. A causa de la temperatura de trabajo y, especialmente, del bombardeo de neutrones, el acero constitutivo de la vasija sufre un proceso de fragilización. Para estimar la pérdida en la tenacidad del material a causa de este proceso, las centrales nucleares han de ubicar en el interior del reactor probetas Charpy hechas a partir del mismo material que la vasija.

El desarrollo de la Mecánica de la Fractura, posterior a la construcción de las primeras unidades nucleares, permite el estudio de la fractura de componentes a través de propiedades más significativas que las correlaciones empíricas obtenidas de los ensayos Charpy. Puesto que en el interior de los reactores únicamente se ubicaron, en bastantes casos, probetas Charpy, existen distintos programas de investigación cuyo objetivo es la obtención de las propiedades representativas de la fractura de materiales a partir de las probetas disponibles.

El presente trabajo se enmarca en uno de los proyectos recientemente mencionados cuyo objetivo es la validación de un procedimiento de reconstrucción de probetas CT a partir de probetas Charpy ya ensayadas para la obtención de la curva J_R de los aceros más comúnmente constituyentes de las vasijas a presión. En dicho proyecto se pretende la validación del procedimiento para distintos materiales, distintas orientaciones del material y distintas geometrías de implante. Esto supone un gran número de ensayos de determinación de la curva J_R (ensayos J) cada uno de los cuales requiere una importante cantidad de trabajo.

De cara a simplificar la tarea experimental, el primer paso que se ha dado ha sido el estudio de la posibilidad del empleo de métodos analíticos simples que permitan la obtención de la curva J_R a partir de ensayos de laboratorio más sencillos que los habitualmente realizados. En este artículo se presentan los resultados obtenidos de la comparación del método experimental normalizado (método de las descargas elásticas) con dos distintos métodos analíticos: método EPRI [1] y método directo [2]

La difícil evaluación del estado tensional real de la probeta entre tensión plana y deformación plana, junto con la falta de ajuste del comportamiento del material a una ley de Ramberg-Osgood, hacen que el empleo del método EPRI no sea apropiado de cara a simplificar la obtención de la curva J_R de forma fiable.

4.3. Método directo

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos a través del método experimental y del método directo para 4 ensayos realizados sobre probetas convencionales. Puede apreciarse cómo ambos métodos conducen a resultados similares, e incluso que a través del método directo los resultados son más repetitivos. Así, el método directo se considera apropiado de cara a obtener curvas J_R fiables.

La bondad del método directo con independencia de las variables utilizadas permite su aplicación al análisis de determinadas variables que pueden afectar al método experimental o a la caracterización del material.

5. APLICACION

5.1. Influencia de la orientación

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos con probetas idénticas pero de distinta orientación. En ambos casos el material es ML pero las probetas son TL y TS. Puede apreciarse cómo la orientación TS presenta valores menores de tenacidad. Comparando los ensayos sobre probetas implantadas 2L2L1 y 6L6L3 se llega a idéntica conclusión.

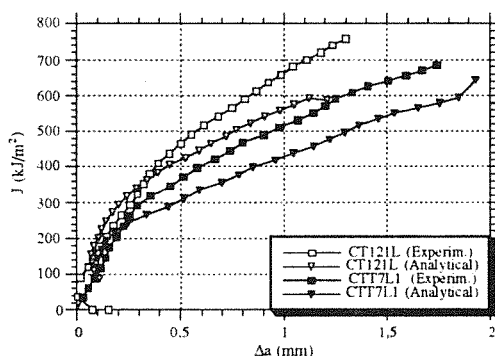


Figura 6: Influencia de la orientación

5.2. Influencia del material

La Figura 7 representa ensayos equivalentes sobre los aceros laminado y forjado, ML y MF respectivamente, ambos sobre probetas de orientación TL. De la observación de la gráfica se concluye que ambos aceros presentan una tenacidad similar, al menos en la orientación estudiada. Una conclusión similar se obtiene comparando los ensayos 2L2L1 y 2F2L1.

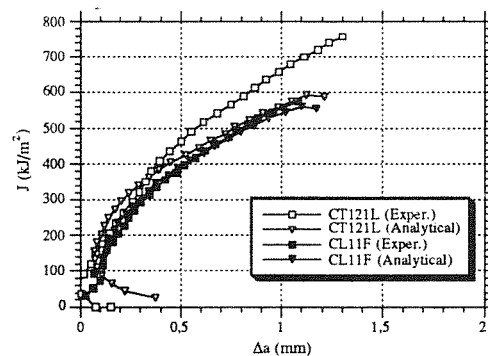


Figura 7: Influencia del material

5.3. Influencia del implante

La Figura 8 contiene los resultados de los ensayos sobre el mismo material, bien en forma de implante, bien con probetas convencionales. Puede apreciarse el acuerdo obtenido en ambos casos, concluyendo así que el proceso de implante no modifica las propiedades de fractura del material. Como en casos anteriores, la comparación de los ensayos CT111L y CT121L con el 2L2L1 y del CT7L1 con el 6L6L1 conducen a la misma conclusión.

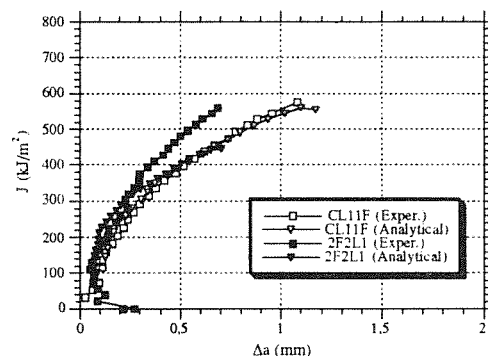


Figura 8: Influencia del implante

6. CONCLUSIONES

El objetivo principal definido al inicio de este trabajo era la evaluación de métodos analíticos que permitieran simplificar la ejecución de ensayos J. Se han estudiado dos métodos, el método EPRI y el método directo, cada uno de los cuales ha conducido a distintas conclusiones.

El método EPRI no conduce a estimaciones satisfactorias de la curva J_R . Las razones de la falta de acuerdo son, por un lado, el desajuste del comportamiento del material a una ley de Ramberg-Osgood y, por otro lado, la situación intermedia en el régimen tensional de la probeta entre los estados de tensión y deformación plana.

El método directo no sólo conduce a resultados similares a los obtenidos mediante el procedimiento experimental

$$J_{pl} = \eta_i \cdot b_i \cdot g\left(\frac{b_i}{W}\right) \cdot A_{N,i} \quad (15)$$

siendo

$$\eta_i = 2 + 0.522 \cdot \left(1 - \frac{a_i}{W}\right) \quad (16)$$

y calculandose $A_{N,i}$ como muestra la Figura 3.

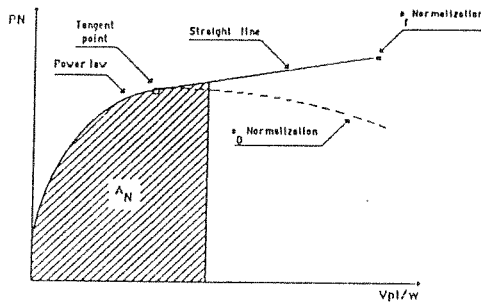


Figura 3: Definición de $A_{N,i}$ [2].

3. MATERIALES Y PROBETAS

3.1. Materiales

Los dos materiales disponibles para el desarrollo de este proyecto son dos aceros al carbono constituyentes típicos de vasijas de reactores nucleares. El primero de ellos es un acero laminado, denominado ML de especificación ASME SA 533 Gr. B Cl. 1 que se utilizará tanto de implante como de material soporte. El segundo es un acero forjado, denominado MF, de especificación ASME SA 508 Cl.3 que se utilizará únicamente como implante.

3.2. Probetas

El modelo de probeta utilizado ha sido de tipo compacto normalizado según ESIS-P1-92 [3]. Las probetas tenían la boca de la grieta escalonada para permitir la medición del desplazamiento del punto de carga mediante un extensómetro. Asimismo las probetas disponían de ranuras laterales para favorecer el crecimiento uniforme de la fisura y la condición de deformación plana. La geometría de la probeta se define a partir del valor de su anchura $W = 20$ mm.

Se han ensayado tanto probetas convencionales como probetas compuestas. La Figura 4 define la geometría del implante para estas últimas [6]. Igualmente se ha estudiado la influencia de la orientación en las propiedades del material tanto en probetas convencionales como implantadas. Las letras L, T y S se refieren a la dirección longitudinal, transversal y transversal corta respecto a la dirección principal de trabajo del material. La orientación de las probetas CT se define mediante 2 letras, la primera define la dirección de la línea de carga y la segunda la de crecimiento de las grietas.

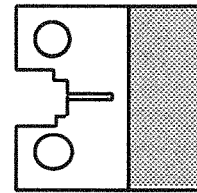


Figura 4: Geometría probetas implantadas

La Tabla 1 define las características y denominación de los ensayos llevados a cabo.

Tabla 1: Ensayos realizados

	Probeta convencional	Probeta con implante
Acero ML Orientación TL	CT 111 L CT 121 L	2L 2L 1
Acero ML Orientación TS	CT 7 L1	6L 6L 3
Acero MF Orientación TL	CL 11 F CL 21 F	2F 2L 1

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Curvas J_R experimentales

Las curvas J_R obtenidas según el método de las descargas elásticas definido en la Norma ESIS P1-92 se encuentran recogidas en la referencia [7]. Algunas de ellas están representadas en los gráficos comparativos contenidos en apartados posteriores de este artículo.

4.2. Método EPRI

La Figura 5 muestra la curva J_R obtenida de forma experimental en el ensayo CT111L junto con las predicciones del método EPRI para los casos de tensión plana y deformación plana. Puede apreciarse la falta de ajuste en ambos casos lo cual lleva a la conclusión que la probeta se comporta en un régimen intermedio entre los dos extremos considerados.

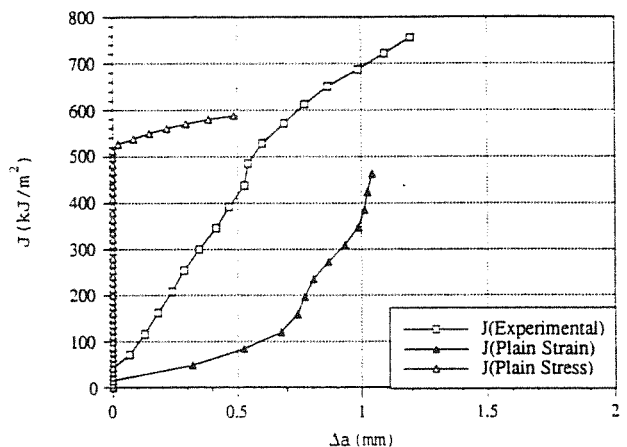


Figura 5: Curvas J_R experimental y EPRI

$$G\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{b^2 \cdot B \cdot g\left(\frac{b}{W}\right)}{W} \quad (4)$$

donde

$$b = W - a \quad (5)$$

$$g\left(\frac{b}{W}\right) = \exp\left(\frac{0.522 b}{W}\right) \quad (6)$$

Así, la carga se puede normalizar mediante esta función:

$$P_N = \frac{P}{G(a/W)} = H\left(\frac{COD_{pl}}{W}\right) \quad (7)$$

La carga normalizada P_N depende exclusivamente de COD_{pl}/W , que es una medida de las propiedades de deformación del material; por tanto, la forma funcional de $H(COD_{pl}/W)$ ha de reflejar la relación tensión-deformación del material. Según el rango de deformaciones, los materiales más comunes ajustan su comportamiento bien a funciones de tipo potencial o bien a funciones lineales. En este trabajo se ha ajustado un modo distinto a cada rango de deformación, una ley potencial en las etapas iniciales y posteriormente una ley lineal, según las expresiones:

$$\left(\frac{COD_{pl}}{W}\right) = A P_N^n \quad (8)$$

$$P_N = D_1 + D_2 \left(\frac{COD_{pl}}{W}\right) \quad (9)$$

La estimación de los parámetros A , n , D_1 y D_2 requeriría el conocimiento de cuatro ecuaciones, es decir, cuatro puntos de la curva P-COD en los que se conozca la longitud de fisura. Sin embargo este parámetro únicamente se conoce al principio y al final del ensayo. Dada la importancia de este ajuste para la estimación de la curva J_R , se ha de definir de una forma objetiva y precisa el procedimiento para calcular la función $H(COD_{pl}/W)$, es decir, los parámetros de ajuste y el rango de aplicación de las funciones potencial y lineal, respectivamente.

Habitualmente, la propagación de las grietas no se inicia hasta alcanzar un determinado valor de COD_{pl}/W . Así, en las etapas iniciales del ensayo, se puede suponer que la longitud de fisura mantiene su valor inicial a_0 .

Por lo tanto, la parte lineal de la ecuación se puede calcular trazando la recta tangente entre el punto de calibración final y la curva calculada a partir de a_0 de los pares $(P_N, COD_{pl}/W)$ según muestra la Figura 2. Con los puntos anteriores al de tangencia se ajusta la parte potencial de la ecuación.

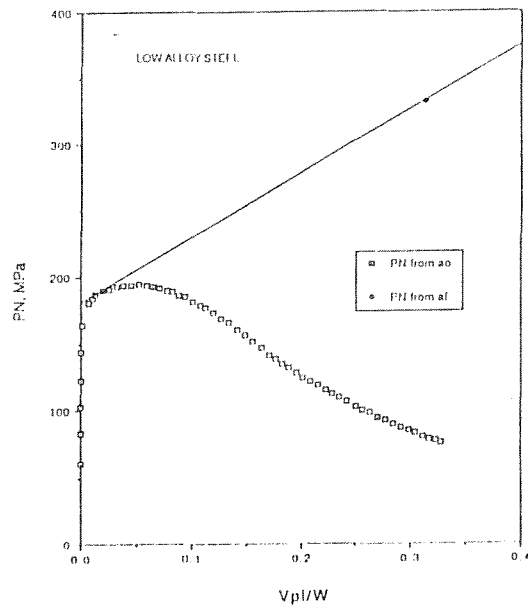


Figura 2: Cálculo de $H(COD_{pl}/W)$ [2].

En conclusión, el procedimiento a seguir para obtener la curva J_R a través del método directo es el siguiente:

- Realizar el ensayo J registrando la curva P-COD.
- Medir la longitud de fisura inicial y final, a_0 y a_f .
- Calcular la carga normalizada P_N en función de a_0 .
- Determinar COD_{pl} deduciendo COD_{el} del desplazamiento total:

$$COD_{pl} = COD - P \cdot C\left(\frac{a}{W}\right) \quad (10)$$

- Determinar (P_N, COD_{pl}) para el instante final del ensayo, usando a_f .
- En un diagrama como el de la Figura 2 determinar los valores de D_1 y D_2 según se ha descrito anteriormente.
- Calcular los pares de valores $(J, \Delta a)$ a partir del punto de tangencia resolviendo la siguiente ecuación:

$$COD = P \cdot C\left(\frac{a_i}{W}\right) + \left(\frac{P_{N,i} - D_1}{D_2}\right) W \quad (11)$$

donde $P_{N,i}$ se deduce de (7) y (4), quedando:

$$P_{N,i} = \frac{P_i W}{b_i^2 \cdot B \cdot g\left(\frac{b_i}{W}\right)} \quad (12)$$

Los valores de la integral J se calculan según:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (13)$$

$$J_{el} = \frac{K_I^2}{E'} \quad (14)$$

2. METODOS DE DETERMINACION DE LA CURVA J_R

La curva J_R representa una medida de la tenacidad a fractura de materiales que se rompen en régimen elastoplástico y, por lo tanto, es la propiedad que se trata de determinar en este trabajo, bien de forma experimental, bien de forma analítica a partir de ensayos más sencillos.

2.1. Procedimiento Experimental

El procedimiento normalizado para la determinación de la curva J_R, ESIS P1-92 [3], requiere la rotura de múltiples probetas. De cada uno de los ensayos se obtiene un punto de la curva J_R, ya que al finalizar el ensayo se pueden medir la propagación de fisura y la integral J aplicada, abscisa y ordenada respectivamente de la curva J_R. Este procedimiento, aunque simple, requiere la disponibilidad de gran cantidad de material. En casos en los que el material de ensayo disponible es escaso, como pasa para las vasijas de reactores nucleares, la norma anteriormente mencionada ESIS P1-92, define dos procedimientos para obtener la curva J_R completa, bien a partir de la caída de potencial eléctrico o bien a partir de la flexibilidad de descargas elásticas que se han de realizar a lo largo de proceso de carga. Cualquiera de los dos procedimientos complica el dispositivo experimental y el post-procesamiento de los datos para elaborar la curva J_R.

Dada la escasez de material de ensayo, en este caso se ha aplicado el método de las descargas elásticas definido en la norma ESIS P1-92 para la obtención de una curva J_R a partir del ensayo de una única probeta. El tipo de probeta utilizado ha sido compacta (CT) con ranuras laterales, de geometría acorde a la norma.

2. 2. Procedimientos analíticos

2.2.1. Método EPRI

El procedimiento de la referencia [1] define la formulación que describe el comportamiento en fractura de componentes en régimen elastoplástico. Dicha formulación se basa en funciones tabuladas dependientes de la geometría, de la longitud de fisura y del comportamiento del material en tracción uniaxial, suponiendo que sigue una ley de Ramberg-Osgood:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \tag{1}$$

donde σ₀ es el límite elástico, ε₀ es la deformación correspondiente y α y n son los parámetros del ajuste.

El procedimiento para obtener la curva J_R se basa en la ejecución de un ensayo J del cual únicamente es necesario el registro de la carga aplicada P, y el desplazamiento del punto de carga, Δ. La formulación

contenida en [1] permite el cálculo de las curvas P-Δ para distintos valores de longitud de fisura, suponiendo ésta constante. La intersección entre la curva experimental y las calculadas para cada longitud de fisura define la curva J_R buscada. Este procedimiento se ilustra gráficamente en la Figura 1.

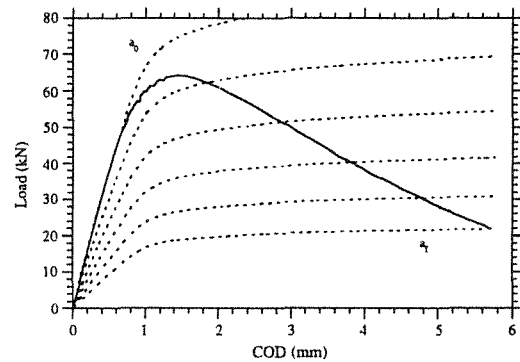


Figura 1: Cálculo de la curva J_R según el método EPRI

2.2.2. Método directo

Este método fue propuesto en la referencia [2] como una alternativa al registro de la longitud de fisura a lo largo del ensayo J. Se basa en la normalización de la carga publicada en las referencias [4, 5] para probetas de flexión con fisuras profundas. El método desarrolla curvas de calibración que relacionan la carga, el desplazamiento y la longitud de fisura. Conocidos dos de estos parámetros, el tercero se puede determinar a través de las curvas de calibración.

El principio de normalización [4, 5] establece que la carga se puede calcular como el producto de dos funciones, cada una de ellas dependiente de la longitud de fisura a y del desplazamiento del punto de carga, Δ (en probetas CT el desplazamiento del punto de carga se puede medir como la apertura de la grieta, COD):

$$P = G\left(\frac{a}{W}\right) \cdot H\left(\frac{COD_{pl}}{W}\right) \tag{2}$$

donde a y COD_{pl} han sido normalizados por la anchura de la probeta, W. El desplazamiento COD ha sido separado en sus componentes plástica y elástica:

$$COD = COD_{el} + COD_{pl} = P \cdot C\left(\frac{a}{W}\right) + COD_{pl} \tag{3}$$

donde C(a/W) es la flexibilidad de la probeta en régimen elástico.

Para probetas CT con grietas profundas, la función G(a/W) es conocida [5]:

normalizado, sino que los resultados que proporciona son incluso más repetitivos. En conclusión, este método resulta apropiado para satisfacer el objetivo inicialmente previsto.

Un objetivo complementario que se ha cubierto en este trabajo ha sido la validación de un procedimiento de implante para la reconstrucción de probetas CT a partir de restos de probetas Charpy ya ensayadas. A continuación se resumen las conclusiones preliminares obtenidas a este respecto:

- De los dos materiales estudiados, el material laminado ML presenta un comportamiento anisótropo, es decir, su tenacidad varía en función de la orientación del plano de fractura.
- Los dos materiales ensayados, laminado y forjado, presentan una resistencia a la fractura similar para orientaciones coincidentes, al menos en la orientación común ensayada TL.
- El proceso de implante, con la geometría y el procedimiento utilizados, no afecta los resultados de caracterización en fractura de los materiales ensayados.

7. REFERENCIAS

- [1] Kumar, V.; German, M.D. and Shih, C.F., "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", Electric Power Research Institute NP 1983, Topical Report, July 1981.
- [2] Herrera, R. and Landes, J.D., "Direct J-R Curve Analysis: A Guide to the Methodology", Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074, J.P. Gudas; J.A. Joyce and E.M. Hackett, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 24-43.
- [3] European Structural Integrity Society, "Recommendation for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials", ESIS P1-92, January 1992.
- [4] Ernst, H.A.; Paris, P.C.; Rossow, M. and Hutchinson, J.W., "Analysis of Load Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material Properties", Fracture Mechanics, ASTM STP 677, C.W. Smith, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1979, pp. 581-599.
- [5] Ernst, H.A.; Paris, P.C. and Landes, J.D., "Estimations on J-Integral and Tearing Modulus T from a Single Specimen Test Record", Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM STP 743, Richard Roberts, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1981, pp. 476-502.
- [6] De Backer, F.; Fernandez, C.; Gutierrez-Solana, F. y Alvarez, J.A.; "Toughness characterisation by testing reconstituted specimens", *Materials Ageing and Components Live Extension*, Milan, Octubre 1995, pp. 137-146.
- [7] Van Wulpen, L., "The Elastic-Plastic Cracking Behaviour of Standard and Compound Specimens Through Analytical and Experimental Prediction of the J-R Resistance Curve", Proyecto Fin de Carrera, 1994-95.