

**RECOMENDACIONES PARA EL REFINAMIENTO DE VARIABLES EN EL
PROCEDIMIENTO SINTAP DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE
COMPONENTES FISURADOS**

J. Ruiz Ocejo y F. Gutiérrez-Solana

**Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de los Castros s/n, 39005 Santander**

Resumen. Los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural existentes hoy en día no presentan indicaciones para el usuario cuando se obtienen resultados no satisfactorios. Todo lo más, advierten sobre la posibilidad de realizar la evaluación en un nivel de análisis más alto. Sin embargo en el procedimiento europeo en desarrollo a través del Proyecto SINTAP, esta cuestión trata de ser resuelta. Así, dependiendo de donde se sitúe el punto de evaluación que representa el estado del componente fisurado, se pueden establecer diversas recomendaciones en las que se orienta al usuario hacia la variable susceptible de mejorar el resultado final del análisis. El propósito de este artículo es definir, por tanto, distintos campos dentro de un Diagrama de Evaluación de Fallo en los que se establezcan las recomendaciones pertinentes para el refinamiento de las variables del problema cuando se obtiene un resultado inaceptable y se pretende ascender a un nivel de evaluación más alto.

Abstract. The Structural Integrity Assessment Procedures used nowadays do not present any indication for the user when unacceptable results are obtained. At the most, they state that there is a chance to perform the assessment on a higher analysis level. However, in the european procedure under development by means of SINTAP Project, this item is being solved. Thus, depending where the assessment point, representing the situation of a cracked component, is located, different recommendations can be established, addressing the user to the variable susceptible to improve the final result of the assessment. The aim of this paper is to define different zones within a Failure Assessment Diagram where the needed recommendations to refine the variables when obtaining an unacceptable result are established in order to go into a higher assessment level.

1. INTRODUCCIÓN

Los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Fisurados existentes en la actualidad no presentan ningún tipo de recomendación cuando los resultados de una evaluación resultan no satisfactorios o inaceptables.

No hay indicaciones para el usuario en cuanto hacia dónde dirigir los pasos que puedan mejorar de algún modo los resultados de sus cálculos. Todo lo más, advierten sobre la posibilidad de realizar la evaluación en un nivel de análisis más alto, si es que se puede mejorar la calidad y/o cantidad de los datos de entrada.

Esta situación trata de resolverse dentro del marco del Proyecto SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry) financiado por la Unión Europea [1-2].

El objetivo es definir diferentes sugerencias dependiendo de donde se sitúe el punto de evaluación que representa el estado del componente fisurado dentro

del plano de representación elegido, esto es, un Diagrama de Evaluación de Fallo (FAD) o un Diagrama de Fuerza Motriz de Fisuración (CDFD), orientando en cada caso al usuario hacia la variable susceptible de mejorar el resultado final del análisis. De este modo se aumenta la productividad de los posibles refinamientos de los parámetros presentes en el problema.

Este artículo presenta el trabajo realizado por la Universidad de Cantabria en este aspecto en el que se proponen sugerencias de refinamiento para el usuario del Proyecto SINTAP para su consideración.

2. CONSIDERACIONES DE PARTIDA

El punto anterior advierte sobre la existencia de dos tipos distintos de planos gráficos sobre los cuales realizar la evaluación estructural del componente a analizar. Las diferencias entre unos y otros han sido largamente debatidas en la bibliografía [3-5] así como el deseo de hacerlos compatibles para así poder disfrutar de las ventajas de cada uno de ellos independientemente del diagrama elegido [6-7]. Dentro del Proyecto

SINTAP, se realizaron avances en ese sentido hasta demostrar que la compatibilidad era totalmente posible [2, 7]. Por lo tanto, ha de reseñarse que, a pesar de que este artículo hace únicamente mención a los Diagramas de Evaluación de Fallo (FAD), toda la metodología expuesta y los resultados son aplicables a los Diagramas de Fuerza Motriz de Fisuración.

La geometría propia de las líneas de fallo y sus valores analíticos permiten, inicialmente, definir las distintas zonas dentro de un FAD en función de unas pendientes límites, es decir, relaciones entre K_r y L_r , a partir de las cuales se establecen unas estimaciones relativas entre el fallo por fractura y el colapso plástico de la estructura.

Estas relaciones se pueden definir mediante dos inecuaciones que delimitan tres zonas distintas en un FAD:

- Zona $K_r/L_r > 1.1$. Puntos donde un fallo por fractura es más probable que el colapso plástico, es decir, recoge situaciones en las que un buen o mejor conocimiento de la tenacidad puede mejorar la evaluación del componente.
- Zona $K_r/L_r < 0.4$. Puntos donde el agotamiento plástico de la estructura es más probable que el fallo por fractura, es decir, recoge situaciones en las que una mejora en la determinación de las propiedades mecánicas convencionales del material acrecienta la posibilidad de evaluación positiva del elemento estudiado.
- Zona $0.4 < K_r/L_r < 1.1$. Puntos intermedios en los que resulta más difícil establecer qué mecanismo resulta determinante.

Como alternativa, más conveniente y cómoda para el usuario, se comenzó a vislumbrar la posibilidad de expresar estas diferencias en función únicamente de L_r .

3. ESTUDIO PRELIMINAR

En primer lugar, y dado que la posible alternativa de transformar las indicaciones descritas a través de los cocientes K_r/L_r en simples valores de L_r , se realizó un trabajo de correlación entre ambas posibles propuestas. Para ello, se analizaron 19 materiales distintos [8], dibujándose dos líneas de fallo para cada uno (las correspondientes a los niveles 1 y 3 del SINTAP. Revisión 5.0 [1]).

Se calcularon los puntos de intersección entre las Líneas de Evaluación y las rectas definidas por las pendientes límites citadas anteriormente con el objeto de establecer si los puntos de corte podían corresponder a un valor determinado de L_r aproximadamente constante para todo tipo de material.

La Figura 1 muestra como ejemplo uno de los materiales evaluados, mientras que, la Tabla 1 presenta los resultados para la totalidad de los materiales.

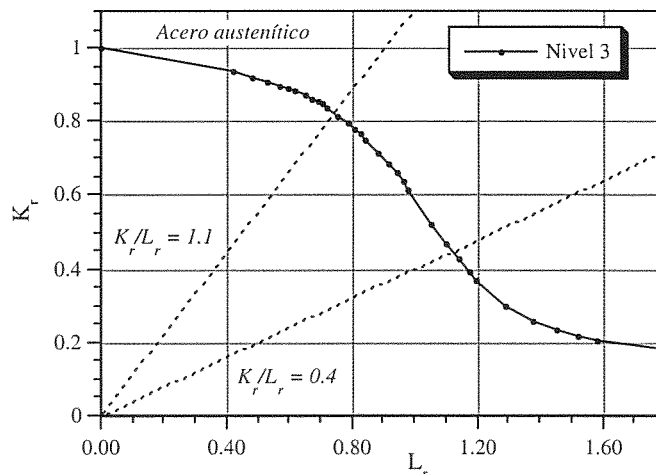


Figura 1. Ejemplo de cálculo. Acero austenítico.

Tabla 1. Puntos de intersección entre distintas líneas de fallo y $K_r/L_r = 1.1$ ó 0.4 .

| Material | $K_r/L_r = 1.1$ | | $K_r/L_r = 0.4$ | |
|-------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | Nivel | Nivel | Nivel | Nivel |
| | L_r | | L_r | |
| Acero 4Y14 A2 S275 JR | 0.74 | 0.79 | 1.02 | 1.00 |
| Acero 4Y17 A2 S355 J2 | 0.83 | 0.79 | 1.03 | 1.00 |
| Acero Y6T8D 355 EMZ | 0.77 | 0.79 | 1.01 | 1.00 |
| Acero Y6T26H 450 EMZ | 0.80 | 0.79 | 1.01 | 1.00 |
| Acero 4Y18 A2 450 EMZ | 0.83 | 0.79 | 1.01 | 1.00 |
| Acero microaleado E500 | 0.79 | 0.76 | 1.07 | 1.04 |
| Acero Y6A22D2C StE690 | 0.76 | 0.77 | 1.03 | 1.04 |
| Acero Y6A4A4D StE690 | 0.72 | 0.77 | 1.07 | 1.04 |
| Acero microaleado E690 (1) | 0.80 | 0.77 | 1.04 | 1.02 |
| Acero microaleado E690 (2) | 0.80 | 0.77 | 1.04 | 1.02 |
| Acero microaleado E690 (3) | 0.80 | 0.77 | 1.04 | 1.02 |
| Acero microaleado E690 (4) | 0.81 | 0.77 | 1.04 | 1.02 |
| Acero normalizado 4135A (1) | 0.77 | 0.77 | 1.04 | 1.04 |
| Acero normalizado 4135A (2) | 0.73 | 0.77 | 1.10 | 1.10 |
| Acero templado 4135B | 0.76 | 0.78 | 1.13 | 1.13 |
| Acero austenítico | 0.75 | 0.75 | 1.12 | 1.11 |
| Acero inoxidable envejecido | 0.74 | 0.75 | 1.17 | 1.10 |
| Acero inoxidable de soldadura | 0.76 | 0.76 | 1.09 | 1.08 |
| Aluminio | 0.76 | 0.75 | 1.09 | 1.11 |

4. ANÁLISIS SOBRE EL REFINAMIENTO

El estudio previo realizado pone de manifiesto una posible correlación entre el establecimiento de límites de zonas de refinamiento diferencial tanto por las pendientes (K_r/L_r) de las rectas desde el origen como en el valor de la abscisa L_r en la representación del Diagrama de Fallo. Aunque estas zonas parecen establecer las variables adecuadas al refinamiento en cada zona, sin embargo no acotan cuándo estos refinamientos pueden ser eficaces. Por ello es necesario un análisis cualitativo y cuantitativo que amplíe el conocimiento sobre la funcionalidad de los refinamientos y sus límites.

4.1. Refinamientos ¿por qué y para qué?

- **Tenacidad**

La variable K_r propia de un componente en evaluación puede ser reducida aumentando el valor considerado para la tenacidad a fractura de su material. En estas condiciones, el punto de evaluación se desplaza verticalmente hacia abajo, es decir, hacia situaciones que representan mayor seguridad (Detalle A de la Figura 2).

- **Tracción**

La jerarquización del Procedimiento [2] establece que si la calidad de los datos de tracción es mejorada, la línea de fallo tiende a una situación menos conservadora que la correspondiente a valores de menor calidad (o menos detallados). Es decir, para cada valor concreto de L_r , la línea de fallo se mueve hacia arriba, aumentando la zona de evaluación segura (Detalle B de la Figura 2).

Asimismo, si el valor del límite elástico resulta superior cuando se refinan los datos, el punto de evaluación se desplaza horizontalmente hacia la izquierda, de nuevo hacia situaciones que representan mayor seguridad (Detalle C de la Figura 2).

La Figura 2 muestra los tres tipos de refinamiento mencionados.

4.2. Refinamientos en las variables. Límites cualitativos y cuantitativos

- **Tenacidad**

No puede haber beneficio alguno en refinar los datos de tenacidad del material constituyente del componente cuando la línea de fallo presenta una caída vertical brusca, que sólo se produce en el cut-off (límite máximo de L_r), y cuando el material presenta escalón de cedencia.

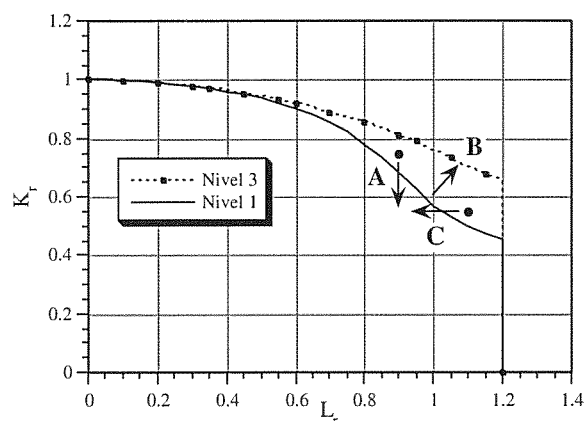


Figura 2. Efectos del refinamiento de variables.

- **Tracción**

Si la Línea de Evaluación de Fallo es prácticamente horizontal o apenas existe diferencia entre las Líneas de los diferentes niveles (1 y 3), no tiene sentido intentar mejorar la calidad y el detalle de los datos. Para cuantificar esta situación, se asume que las diferencias entre las distintas Líneas son significativas cuando superan un valor dado, que debe ser fijado.

- **Ambos**

El refinamiento es inoperante cuando el punto de evaluación está tan lejano de la línea de evaluación de fallo que incluso cuando se aplican las máximas incertidumbres a las variables del proceso, el resultado sigue siendo inaceptable.

La máxima incertidumbre admitida para la tenacidad [1] es 2 si se expresa en términos de J , equivalente a $1.4(\sqrt{2})$ para valores de K . Con respecto a los datos de tracción, se supone que las incertidumbres no pueden exceder un valor del 10%.

5. APLICACIÓN

5.1. Límite para refinamiento en K

Dado que la incertidumbre en los valores de tenacidad es relativamente importante, el refinamiento es siempre recomendable a menos que el punto de evaluación caiga más allá del cut-off, como se representa en la Figura 3.

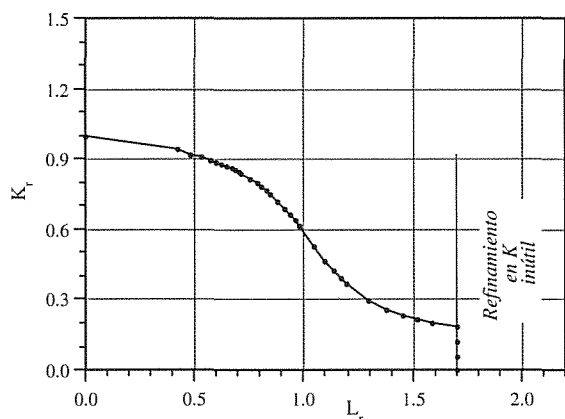


Figura 3. Límite para el refinamiento en K.

5.2. Límite para refinamiento en tracción

Para analizar las posibles diferencias entre líneas de fallo, se consideró que existen dos líneas de evaluación de fallo (Figura 4) correspondientes a situaciones teóricas límites entre las cuales debe situarse cualquier otra línea de evaluación correspondiente a un material real.

Las líneas límite son:

- La correspondiente a un material elástico lineal perfecto, definida por:

$$K_r = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} \quad (1)$$

- La correspondiente a un material cuyo abandono dentro del campo elástico del comportamiento perfectamente lineal sea máximo, caracterizado en el SINTAP porque el parámetro μ adquiere un valor de 0.6 [1, 6]. La ecuación que define tal Línea es:

$$K_r = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} [0.3 + 0.7\exp(-0.6L_r^6)] \quad (2)$$

A partir de ambas líneas límite, se evaluó la diferencia relativa entre ellas correspondiente al valor K_r en función de L_r , que se representa en la Figura 5, de acuerdo con la expresión:

$$\text{Dif}(\%) = \frac{K_{r(\text{eq. 1})} - K_{r(\text{eq. 2})}}{K_{r(\text{eq. 2})}} \cdot 100 \quad (3)$$

Dependiendo de la diferencia que se asuma como significativa para que exista mejora efectiva en un proceso de refinamiento se puede determinar qué rango de L_r , desde cero hasta el de corte para la condición límite establecida, es inútil para el refinamiento en los parámetros de tracción asociado a la variación de la

línea de fallo. La Figura 5 muestra cómo se obtienen estos valores L_r límite.

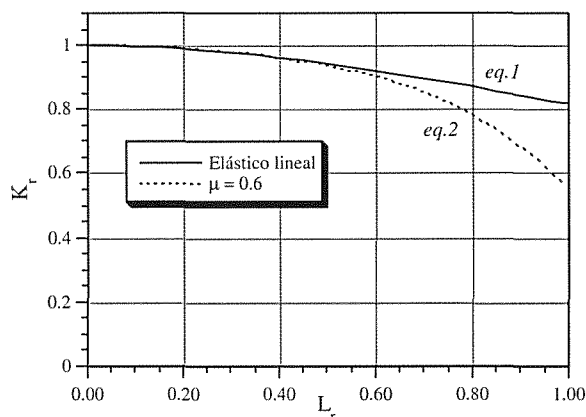


Figura 4. Líneas de fallo límite teóricas.

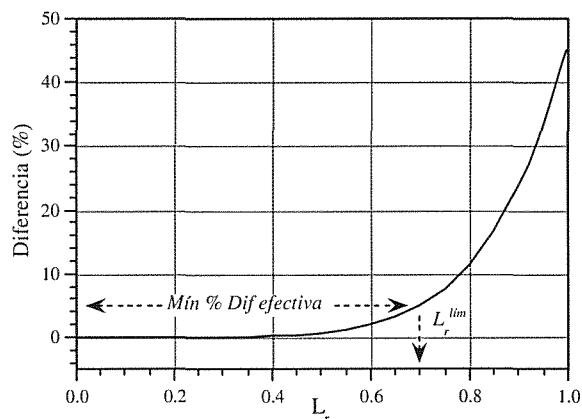


Figura 5. Diferencia relativa (%) entre las líneas de fallo extremas.

La Tabla 2 muestra tres consideraciones de diferencia admisible, 5, 10 y 12%, por debajo de los cuales resulta inútil el refinamiento. Los correspondientes valores de corte (0.70, 0.78 y 0.82) indican una buena correlación con el criterio de $K_r/L_r = 1.1$ que ofrecía un valor medio en torno a 0.77 para los materiales estudiados.

Así, la Figura 6 amplía la Figura 3 con la zona inútil al refinamiento en tracción con un L_r límite de 0.70.

Tabla 2. Diferentes límites considerados para refinamiento en tracción.

| Mín % Diferencia efectiva | L_r límite |
|---------------------------|--------------|
| 5 | 0.70 |
| 10 | 0.78 |
| 12 | 0.80 |

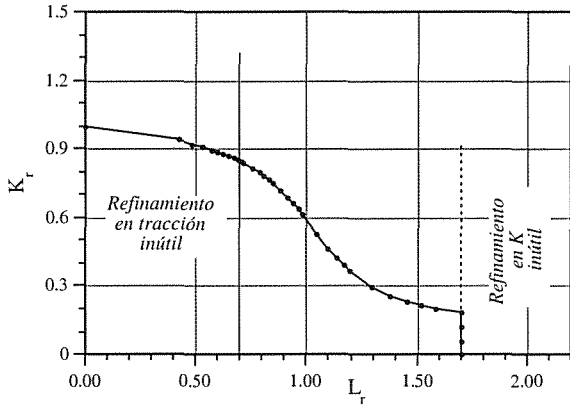


Figura 6. Límite para el refinamiento en tracción.

5.3. Determinación de zonas de exclusión al refinamiento

En atención a las máximas incertidumbres previstas en tenacidad medida en K (40%) y en tracción (10%) se definen unas zonas en el exterior de la seguridad definida por las líneas de fallo, correspondientes a las evaluaciones que no podrían pasar a ser seguras ni siquiera con un refinamiento que incorporara dichas incertidumbres máximas.

Para establecer el límite por tenacidad, se define, inicialmente, una línea de fallo propia de un material hipotético que encerrara una zona de seguridad lo más amplia posible para el nivel 1.

Ello corresponde para $L_r > 1$ a la línea correspondiente al caso elástico lineal perfecto:

$$K_r = \left[1 + \frac{L_r^2}{2} \right]^{-1/2} \tag{4}$$

Para $L_r > 1$ se toma como línea de fallo la de un material con endurecimiento por deformación con un valor N muy elevado (0.5). Así

$$K_r = K_{r(L_r=1)} L_r^{\frac{N-1}{2N}} = \sqrt{\frac{2}{3}} L_r^{-0.5} = \sqrt{\frac{2}{3L_r}} \tag{5}$$

La Figura 7 recoge la línea así definida y aquella que corresponde a multiplicar K_r por el factor 1.4 (máxima incertidumbre en K). Cualquier punto por encima de esta última sería imposible de entrar en la zona de seguridad haciendo una selección lo más realista posible de la tenacidad. Finalmente, esta zona ha sido delimitada mediante ecuaciones sencillas, contenidas en la Tabla 3, que dejan el análisis del lado de la seguridad como puede verse en la Figura 7.

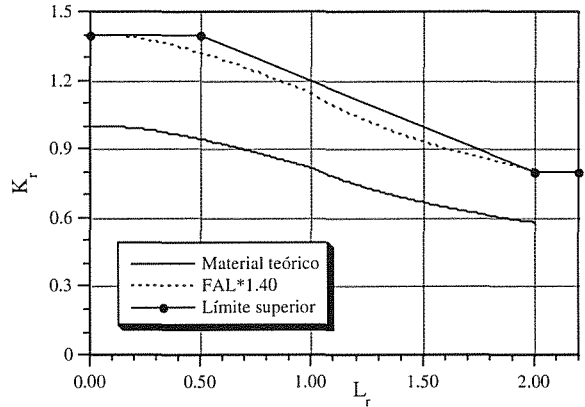


Figura 7. Evaluación del límite superior para refinamiento de K.

Tabla 3. Límite superior para refinamiento en K.

| Intervalo de L_r | Límite para K_r |
|--------------------|-------------------|
| 0.0 - 0.5 | 1.4 |
| 0.5 - 2.0 | 1.6 (1- L_r /4) |
| > 2.0 | 0.8 |

En el caso del límite por tracción, el máximo error del 10% hace que se establezca su límite en abscisas L_r , correspondiente al valor $1.1 \cdot L_r^{\max}$, siendo L_r^{\max} el definido en el procedimiento para el corte de la línea de fallo. La Figura 8 incorpora a la Figura 6 las zonas de exclusión por K (Figura 7) y la correspondiente a la tracción.

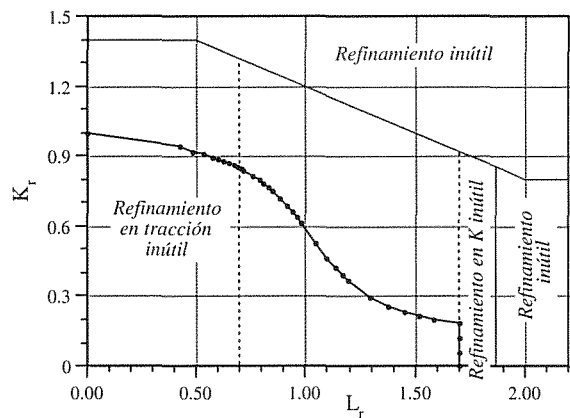


Figura 8. Límite superior para los refinamientos.

6. PROPUESTA FINAL

De todo lo anteriormente establecido se puede determinar en el campo bidimensional L_r - K_r , en el que se definen los Diagramas de Fallo (FADs), diferentes zonas de selección de valores de refinamiento en los análisis de evaluación estructural. Estas zonas vienen definidas en la Figura 9.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido llevado a cabo dentro del proyecto SINTAP financiado por la Unión Europea, cuyos objetivos se enmarcan dentro del programa BRITE-EURAM III.

8. REFERENCIAS

- [1] SINTAP Procedure Revision 5.0 (Draft), January 1999.
- [2] Gutiérrez-Solana F. y Ruiz Ocejo J., "El SINTAP como Procedimiento Jerarquizado de Evaluación de Integridad Estructural con Compatibilidad entre Distintos Métodos", Anales de Mecánica de la Fractura, 16, 6 páginas, 1999.
- [3] Milne I., "Component Assessment: Fracture Mechanics for Added Value", Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications, ESIS/EGF 9 (Edited by J.G. Blauel and K.-H. Schwalbe), Mechanical Engineering Publications, London, pp. 943-955, 1991.
- [4] Gorrochategui I., "Comportamiento en rotura de tuberías de alta tenacidad con sustentación hiperestática en régimen elastoplástico", 1993, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- [5] Ruiz Ocejo J., González-Posada M.A., Gorrochategui I. y Gutiérrez-Solana F., "Presente y Futuro de los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Fisurados", Anales de Mecánica de la Fractura, 14, pp. 417-420, 1997.
- [6] Ruiz Ocejo J., González-Posada M.A., Gorrochategui I. y Gutiérrez-Solana F., "Análisis Comparativo de los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural de Componentes Fisurados", Anales de Mecánica de la Fractura, 15, pp. 115-119, 1998.
- [7] Ainsworth R.A., Kim Y.-J., Zerbst U, Gutiérrez-Solana F. and Ruiz Ocejo J., "Driving Force and Failure Assessment Diagram Methods for Defect Assessment", OMAE Conference, Lisbon, July 1998.
- [8] Ruiz Ocejo J. and Gutiérrez-Solana F., "Recommendations for Data Refinement to Perform a Higher Level of Analysis", Report SINTAP/UC/12, November 1998.

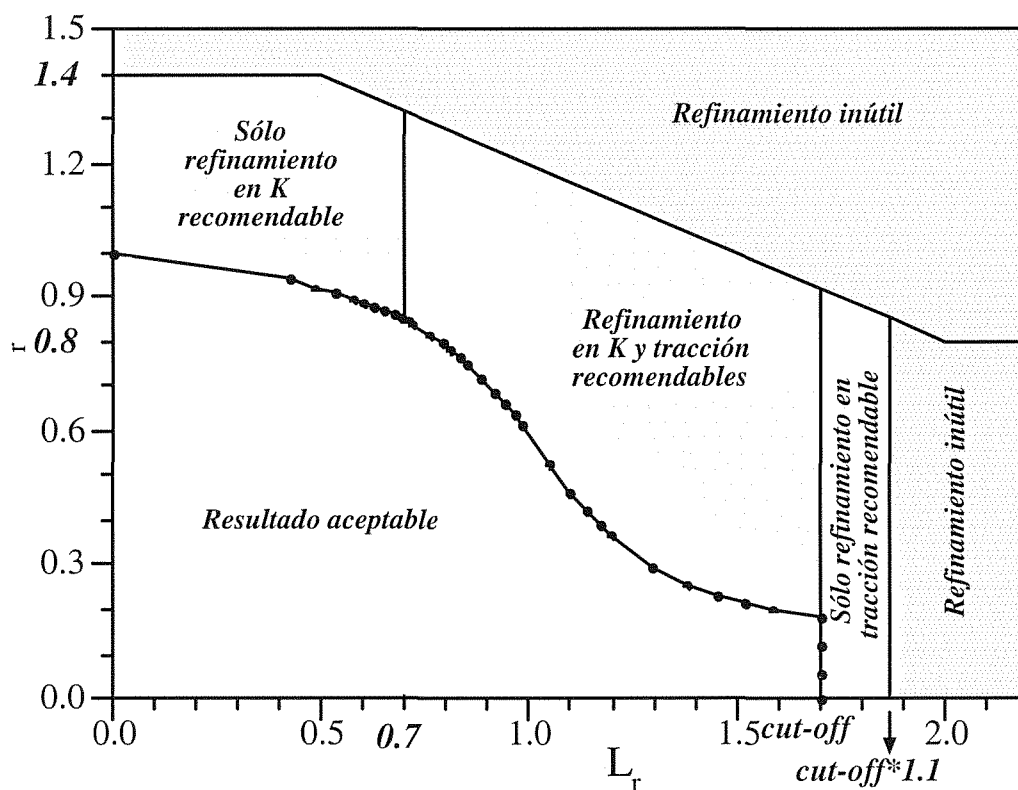


Figura 9. Propuesta final de zonas de refinamiento.