

**Estudio de la propagación de fisuras en
materiales metálicos mediante la técnica de
emisión acústica**



VATCOFF LUCIANO EZEQUIEL

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del

Comahue como requisito para la obtención del grado de

INGENIERO MECÁNICO

Neuquén – Argentina

AÑO 2022

Estudio de la propagación de fisuras en materiales metálicos mediante la técnica de emisión acústica

VATCOFF LUCIANO EZEQUIEL

Director: Prof. **SANTARELLI EDGARDO**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén – Argentina

AÑO 2022

Estudio de la propagación de fisuras en materiales metálicos mediante la técnica de emisión acústica

VATCOFF LUCIANO EZEQUIEL

Aprobado en fecha 30 de Noviembre de 2020

Tribunal evaluador:

- Dr. Ing. Ceferino Steimbregger
- Dra. Ing. Mariana Poliserpi
- Dr. Fernando Perez Quintián

Neuquén – Argentina

AÑO 2022

Agradecimientos

Llegada esta instancia en mi carrera, al mirar hacia atrás puedo ver el camino que he transitado, durante el cual he vivido muchas emociones y sentimientos diferentes. No puedo dejar de reconocer a todas las personas que han formado parte de dicho camino. Por este motivo, quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas ellas. En primer lugar, a mi familia que me ha acompañado en todo momento, en especial a mis padres, Rubén y Gabriela, quienes son los pilares de mi vida y me brindan día a día su apoyo incondicional.

Les quiero dedicar un especial agradecimiento a todos mis amigos, aquellos que conocí a través de la carrera, con quienes ha sido tan grato y ameno compartir tantas horas de estudio.

A la Universidad Nacional del Comahue, donde pude llevar a cabo mis estudios para formarme como profesional, y a todos los docentes que formaron parte de este proceso, quienes supieron transmitirme sus conocimientos con gran dedicación.

Por último, quiero dar mi más franco agradecimiento a quien fue mi tutor de este Proyecto Integrador Profesional, el Profesor Edgardo Santarelli , quien ha sabido guiarme y aconsejarme a lo largo de todo el proyecto con todo los conocimientos que posee, también a Pablo Manzione y Pedro Sosa por acompañarme en el desarrollo experimental de este trabajo con gran dedicación y experticia lo cual ha hecho que el desarrollo de este trabajo haya sido muy gratificante.

Estudio de la propagación de fisuras en materiales metálicos mediante la técnica de emisión acústica

Autor: Vatoeff Luciano Ezequiel
Director: Prof. Santarelli Edgardo

Resumen

En este trabajo se analizaron diversos procedimientos de medición de fisura para la realización de ensayos de Mecánica de Fractura Elastoplástica. En particular, el interés se centró en el parámetro de iniciación de crecimiento de fisura J_{IC} , el cual es considerado propiedad del material. Aun cuando las técnicas de evaluación de J_{IC} mediante curvas de resistencia, tanto por el método de probetas múltiples, como por métodos de probeta única están bien establecidas, existe una importante incertidumbre respecto de la relación entre el parámetro así determinado y el verdadero inicio del proceso de crecimiento estable de la fisura. La técnica de Emisión Acústica (EA) brinda la posibilidad de detectar el evento de inicio sin mayores ambigüedades. Por lo tanto, se compararon los eventos determinados por esta técnica, con los resultados obtenidos mediante los métodos de curvas de resistencia durante ensayos de fractura de materiales metálicos. A este fin, se instrumentaron probetas de acero prefisuradas, con sensores de EA y en paralelo con los sensores necesarios para la evaluación de crecimiento estable de fisuras por el método del Doble Clip Gauge (DCG). Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos para los ensayos de probeta única establecidos en la norma ASTM E1820. Además se incorporó el método de Normalización, también incluido en la Norma ASTM E1820, el cual permite obtener la curva $J-\Delta a$ directamente a partir del registro "Carga vs Desplazamiento" y las longitudes inicial y final de fisura. Adicionalmente, la metodología permitió analizar efectos del parámetro M , que determina la pendiente de la línea de construcción, sobre la curva de resistencia. Esto nos permitió presentar un nuevo enfoque para obtener un valor de J característico del material a partir de la técnica de Emisión Acústica

Palabras claves: Mecánica de Fractura, Integral J, Emisión Acústica

Study of the propagation of cracks in metallic materials by means of the acoustic emission technique

Author: Vatoeff Luciano Ezequiel

Advisor: Prof. Santarelli Edgardo

Abstract

In this work, the analysis of Elastoplastic Fracture Mechanics in terms of the Integral J was approached. In particular, the interest is focused on the crack growth initiation parameter J_{IC} , which is considered a property of the material. Even though the techniques for evaluating J_{IC} using resistance curves, both by the multiple specimen method and by single specimen methods are well established, there is a significant uncertainty regarding the relationship between resulting parameter and the true beginning of the stable growth process of the crack. The Acoustic Emission (AE) technique offers the possibility to detect the initiation event without major ambiguities. Therefore, the events determined by this technique were compared with the results obtained by the methods of resistance curves during fracture tests of metallic materials. For this purpose, pre-cracked steel specimens were instrumented with EA sensors and, in parallel, with the sensors necessary for the evaluation of stable crack growth by the Double Clip Gauge (DCG) method. The tests were carried out following the guidelines for single specimen tests established in the ASTM E1820 standard. In addition, normalization data reduction technique was also included in the ASTM E1820 standard, which allowed to obtain the curve $J-\Delta a$ directly from the load-displacement register and the initial and final crack lengths. Furthermore, the effects of the parameter M , which determines the slope of the construction line on the resistance curve, could be analyzed with to the applied methodology. This allowed to present a new approach to obtain a characteristic J value of the material from the Acoustic Emission technique.

Keywords: *Fracture Mechanics, J Integral, Acoustic Emission*

INDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVO	3
3.	MARCO TEÓRICO	4
3.1.	Mecánica de Fractura Elastoplástica	4
3.1.1.	Introducción	4
3.1.2.	Desplazamiento de la apertura del frente de grieta	6
3.1.3.	La Integral de contorno J	8
3.1.4.	Curva de resistencia $J-R$	13
3.1.5.	Medición del crecimiento estable de fisura.	15
3.2.	Generación de Emisión Acústica durante la fractura	17
3.2.1.	Introducción	17
3.2.2.	Fundamento físico.....	17
3.2.3.	Señales de Emisión Acústica	18
3.2.4.	Parámetros de una señal transitoria de E.A	19
3.3.	Estándares establecidos en la norma ASTM E1820	22
3.3.1.	Introducción	22
3.3.2.	Ensayo de flexión sobre probetas SE(B)	22
3.3.3.	Método de Normalización	28
4.	DESARROLLO	31
4.1.	Procedimiento experimental	31
4.1.1.	Introducción	31
4.1.2.	Dimensionamiento y composición química.....	31
4.1.3.	Montaje e instrumentación de la probeta	32
4.1.4.	Aplicación de la carga y registro de datos	33
4.1.5.	Teñido térmico y medición de Δa	34
4.1.6.	Determinación de las propiedades mecánicas.....	35
4.1.7.	Caracterización de la microestructura.....	37
4.2.	Resultados.....	41
4.2.1.	Introducción.	41
4.2.2.	Análisis de las señales de E.A.....	42
4.2.3.	Resultados de carga – desplazamiento - tiempo.	45

4.2.4.	Relación entre la carga y la E.A.....	48
4.2.5.	Medición del crecimiento estable mediante DCG.	51
4.2.6.	Relación entre el DCG y la E.A.....	53
4.2.7.	Cálculo de la integral J.....	54
4.3.	Discusión de los resultados obtenidos	66
4.3.1.	Introducción	66
4.3.2.	Influencia del parámetro “M” en el valor de la integral J.....	66
4.3.3.	Origen del evento característico.....	69
5.	CONCLUSIONES	73
6.	BIBLIOGRAFÍA	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Corrección de Irwin para la zona plástica	5
Figura 3.2: Proceso de crecimiento de fisura.....	6
Figura 3.3: Enromamiento típico de una propagación estable.....	6
Figura 3.4: Diagrama típico Carga vs Desplazamiento de la apertura de la boca de fisura	7
Figura 3.5: Modelo “ <i>plastic hinge</i> ”	8
Figura 3.6: Contorno arbitrario en el frente de fisura para la determinación de J	9
Figura 3.7: Procedimiento experimental para determinar J propuesto por Landes y Begley.....	11
Figura 3.8: Probeta fisurada sometida a flexion simple.....	11
Figura 3.9: Curva de resistencia típica para un material dúctil	14
Figura 3.10: Condiciones de equilibrio entre la carga y la resistencia al crecimiento de fisura	14
Figura 3.11: Instrumentación del método del Doble Clip Gauge.....	16
Figura 3.12: Fuente de E.A generando ondas elásticas	18
Figura 3.13: Representación de una señal de E.A	19
Figura 3.14: Señal transitoria de E.A y sus parámetros característicos	20
Figura 3.15: Dimensiones básicas de una probeta SE(B).	22
Figura 3.16: Definición del área utilizada en el cálculo de J mediante el método básico.....	24
Figura 3.17: Definición del área plástica para el cálculo de J mediante la curva de resistencia.	25
Figura 3.18: Rectángulo de validez para la curva de resistencia.	26
Figura 3.19: Definición de las líneas de construcción y exclusión para la selección de los datos utilizados en la regresión lineal.	28
Figura 4.1: Esquema de la instrumentación utilizada en la adquisición de datos.....	32
Figura 4.2 : Equipamiento utilizado para la realización de los ensayos.	33
Figura 4.3: Teñido térmico sobre la superficie de fractura. Probeta 1.....	34
Figura 4.4: Probeta 1 montada en la máquina universal de ensayo,.....	36
Figura 4.5: Método de compensación para determinar la tensión de fluencia.	37
Figura 4.6: Caras de la muestra sobre las cuales se realizaron las metalografías.....	38

Figura 4.7: Metalografías de las cara interna y externa sobre la muestra extraída de cada probeta.....	39
Figura 4.8: Orientación de le fisura respecto al sentido de laminación de la chapa..	40
Figura 4.9: Diagrama de flujo que explica cómo fueron analizados los datos	42
Figura 4.10: Amplitud de las señales de E.A registradas durante los ensayos.	43
Figura 4.11: Energía y energía acumulada de las señales registradas durante la prueba de flexión	45
Figura 4.12: Diagrama Carga vs DPC de cada probeta ensayada	47
Figura 4.13: Diagrama Carga vs Tiempo.....	48
Figura 4.14: Correlación de las señales de carga y energía versus tiempo.....	50
Figura 4.15: Registro típico del crecimiento de fisura mediante el DCG.....	51
Figura 4.16: Inicio de crecimiento estable según el registro del DCG.	53
Figura 4.17: Grafica J vs Δa	56
Figura 4.18: Selección de datos utilizados en la regresión lineal. Probeta 2.....	57
Figura 4.19: Valores de J_0 y J_Q determinados a partir de la curva J-R construida a partir del método de DCG	59
Figura 4.20: Procedimiento para la aplicación del método de Normalización.	60
Figura 4.21: Curva J vs Δa obtenida mediante el método de normalización.....	63
Figura 4.22: Valores de J_0 y J_Q determinados a partir de la curva J-R construida con el método de Normalización.....	64
Figura 4.23: Valores de J_0 y J_Q obtenidos para valores de $M=3$ y $M=4$, sobre las curvas construidas con el DCG.	67
Figura 4.24: Valores de J_0 y J_Q obtenidos para valores de $M=3$ y $M=4$, sobre las curvas construidas con el método de Normalización	68
Figura 4.25: Superficie de fractura de la probeta 4 vista en el SEM	70
Figura 4.26: Etapas de carga realizadas durante la prueba y sus respectivas actividades acústicas.....	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Dimensiones básicas de las probetas y su relación W/B.	31
Tabla 4.2: Composición química de las probetas ensayadas.	32
Tabla 4.3: Longitudes inicial y final de fisura resultantes del teñido térmico.	35
Tabla 4.4: Dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción	35
Tabla 4.5: Valores de la tensión de fluencia y tensión ultima para cada probeta.	37
Tabla 4.6: Tensión de fluencia, última y efectiva resultantes para cada probeta.	37
Tabla 4.7: Amplitud del evento característico registrado durante cada ensayo.	43
Tabla 4.8: Carga máxima alcanzada por cada probeta.	47
Tabla 4.9: Valor de carga alcanzado en el tiempo del EvC.	50
Tabla 4.10: Inicio de crecimiento predicho por el DCG.	53
Tabla 4.11: Tiempo para el cual se registra el inicio de crecimiento según el método del DCG y la E.A.	54
Tabla 4.12: Valores de J determinados para la carga en la que ocurre el evento característico.	54
Tabla 4.13: Pendiente de la línea de construcción para cada probeta.	57
Tabla 4.14: Valores de las constantes C_1 y C_2 resultantes para cada probeta.	58
Tabla 4.15: Valores de J_0 y J_Q para cada probeta.	60
Tabla 4.16: Valores de las constantes de ajuste.	61
Tabla 4.17: Valores de J_0 y J_Q obtenidos a partir del método de Normalización.	65
Tabla 4.18: Comparación de los valores de J obtenidos por tres métodos diferentes.	65
Tabla 4.19 Comparación de los valores de J_{EA} con los valores de J_0 y J_Q obtenidos para $M = 3$ y $M = 4$	69
Tabla 4.20: Composición química de la Probeta 4.	70

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica de fractura es la parte de la ciencia de materiales que estudia la respuesta de las estructuras y componentes estructurales susceptibles de contener defectos, en particular fisuras agudas, a solicitaciones mecánicas. La tenacidad a la fractura es la propiedad que representa la resistencia del material a la extensión de una fisura. Poder caracterizar esta propiedad resulta de interés en un amplio campo de la ingeniería. En general la fractura por solicitaciones mecánicas se divide en tres casos:

- Las de tipo frágil o inestable, cuyos fundamentos fueron planteados por Griffith (Anderson, 2017), y dieron lugar a lo que hoy se conoce como Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE). En este marco, los parámetros que describen el fenómeno son la tasa de liberación de energía “G” y el factor de intensidad de tensiones “K”. La teoría planteada por Griffith y posteriormente reinterpretada por Irwin y Orowan, establece que cuando se alcanzan los valores críticos de estos parámetros la fisura crece en forma inestable a la velocidad del sonido en el seno del material bajo análisis (Anderson, 2017)
- Las de tipo elastoplástico, en las cuales el proceso de deformación plástica delante de la punta de fisura juega un rol preponderante y dio lugar a la Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP). Los parámetros comúnmente utilizados para caracterizar este comportamiento son la “Integral J”, parámetro que caracteriza el campo de tensiones en la punta de la fisura y el “Desplazamiento de apertura de la punta de fisura (CTOD: Crack Tip Opening Displacement) (Aranda. J. L, 2002). En estas condiciones la fisura puede crecer de manera estable, y una vez iniciado el crecimiento, su magnitud (Δa) tendrá una correlación con la cantidad de trabajo entregado al cuerpo en cuestión.
- La fractura por fatiga, la cual ocurre por la acción repetida de deformaciones plásticas alternadas altamente localizadas, las cuales conducen a la creación de una grieta o a la propagación de una fisura ya existente (Aranda. J. L, 2002). Este fenómeno fue estudiado por Paris, quien estableció una relación entre el incremento de longitud de la fisura en cada ciclo y la variación del factor de intensidad de tensiones “ ΔK ” (Hertzberg, 2013).

En este trabajo se abordó el análisis de Mecánica de la Fractura Elastoplástica, en el cual a fin de caracterizar el fenómeno, es necesario determinar valores de J y caracterizar el proceso de iniciación y crecimiento de fisura. Los valores de iniciación para diferentes materiales se han estudiado a partir de modelos teóricos, numéricos y experimentales (Paranjpe. S. A, 1979). En la actualidad la norma ASTM E1820, establece un procedimiento para el cálculo de J mediante la construcción de la curva de resistencia (Curva-R o Curva J -R), para lo cual es menester determinar la variación del tamaño de fisura (Δa), durante el ensayo.

Por otro lado, la EA es una técnica de ensayo no destructivo capaz de captar las ondas elásticas que se propagan a través del material producto de una liberación espontánea de energía cuando el material es sometido a un esfuerzo, situación que ocurre durante la propagación de una fisura. (Lysak, 1996)

A lo largo del trabajo se presenta el estudio de los parámetros, más precisamente J , que caracterizan la Mecánica de la Fractura Elastoplástica a partir del análisis de las señales de Emisión Acústica que se generan durante el ensayo de fractura de un acero ASTM A514 Gr T con un porcentaje de trabajado en frío del orden del 10%.

2. OBJETIVO

El objetivo principal en el que se centró este trabajo fue abordar aspectos del crecimiento de fisura en ensayos de Mecánica de Fractura Elastoplástica mediante la técnica de Emisión Acústica. Estos aspectos involucran el inicio del crecimiento, el cual es en alguna medida esquivo y se lo evalúa actualmente en forma convencional. Este evento es importante dado que permite determinar un valor del parámetro J considerado propiedad del material (J_{IC}). Los resultados obtenidos mediante EA fueron comparados con los valores obtenidos mediante dos métodos de probeta única establecidos en la norma ASTM E1820. Los procedimientos utilizados fueron: por un lado, el método estándar en el que se debe medir el crecimiento de fisura para la generación de una curva de resistencia, y el método de normalización que permite obtener una curva de resistencia a partir del registro “Carga vs Desplazamiento” y la longitud inicial y final de la fisura.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Mecánica de Fractura Elastoplástica

3.1.1. Introducción

La Mecánica de Fractura Lineal Elástica es válida únicamente si la deformación plástica en el frente de la grieta está limitada a una pequeña región, la cual se conoce como “Zona Plástica”. El análisis elástico lineal de una fisura predice tensiones infinitas en el frente de la grieta, y en la práctica todos los materiales son capaces de desarrollar un grado de deformación plástica. En la medida que se desarrolla esta plasticidad en la punta de la fisura los valores extremos de las tensiones se amortiguan, y aumenta la resistencia a la fractura frágil (Anderson, 2017), esto hace que la MFLE sea cada vez menos exacta a medida que crece la zona plástica. Irwin y Dugdale hicieron correcciones para determinar el tamaño de la zona plástica en condiciones de plasticidad moderada (Aranda. J. L, 2002). Irwin estableció que la aparición de la zona plástica hace que la grieta se comporte como si en realidad fuera más larga, y que la tensión efectiva en el frente de la grieta está limitada en el valor del límite elástico σ_{YS} . En la Figura 3.1 se muestran los valores de tensión en la punta de la fisura propuestos por la MFLE y la corrección propuesta por Irwin.

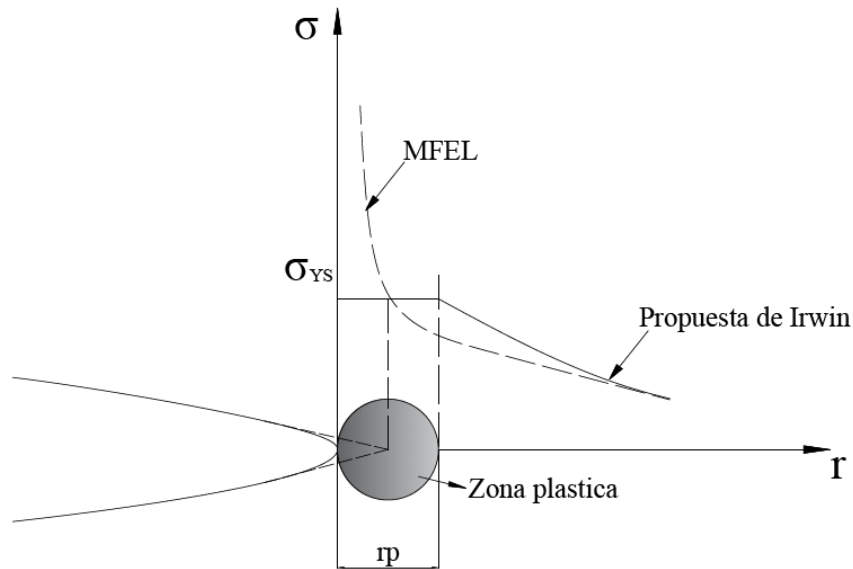


Figura 3.1 Corrección de Irwin para la zona plástica. Adaptada de (Aranda. J. L, 2002)

Cuando la zona plástica es más pronunciada estas correcciones dejan de ser válidas y se deberán tener en cuenta parámetros que evidencien el comportamiento no lineal de los materiales. La Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP) estudia la relación entre la tensión aplicada, el tamaño de fisura y la tenacidad del material para situaciones donde la propagación de la fisura ocurre después de una deformación plástica significativa, esto se conoce como fractura dúctil (Anderson, 2017). El proceso de fractura dúctil, esquematizado en la Figura 3.2, ocurre por la iniciación y crecimiento estable de una grieta. Este proceso puede ser dividido en los siguientes pasos (Perez Ipiña, 2004):

- La fisura va adquiriendo una forma roma con las primeras cargas.
- De la punta roma de la grieta se desarrolla una nueva fisura aguda.
- La fisura crece de forma estable.
- La fisura crece de manera inestable.

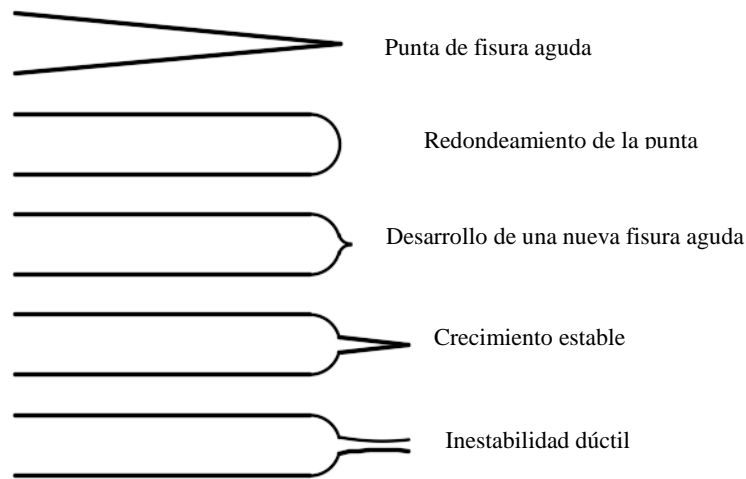


Figura 3.2: Proceso de crecimiento de fisura. Adaptada de (Perez Ipiña, 2004)

A continuación se desarrollaran dos parámetros fundamentales para el análisis elastoplástico de una fisura en estas condiciones: el desplazamiento de la apertura del frente de grieta ó CTOD, que es un acrónimo del inglés Crack Tip Opening Displacement, y la integral de contorno J. Ambos parámetros pueden ser usados como criterios de fractura determinando su valores críticos.

3.1.2. Desplazamiento de la apertura del frente de grieta

En 1961, Wells observo que para materiales de alta tenacidad, como es el caso de los aceros, la grieta se enromaba en su frente, en inglés se conoce como “*Blunting*”, de tal forma que cuando mayor era el enromamiento, mayor era la tenacidad del material. Fue así que surgió el interés de asociar la medida de la apertura del frente de grieta a la tenacidad de estos materiales. (Anderson, 2017)

Wells propuso que la grieta es susceptible de propagarse cuando el desplazamiento en el frente de grieta (CTOD) alcanza un valor crítico. En la Figura 3.3 se define gráficamente el parámetro CTOD (δ).

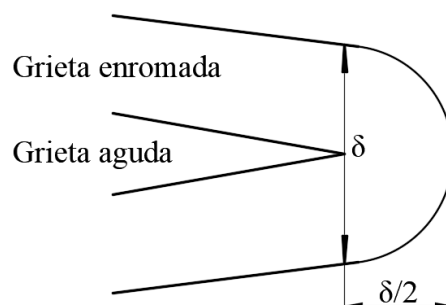


Figura 3.3: Enromamiento típico de una propagación estable. Adaptada de (Aranda, J. L, 2002)

3.1.2.1. Determinación experimental del CTOD

Durante el ensayo para la determinación del CTOD se requiere registrar la carga “P” y el desplazamiento de la apertura de la boca de fisura “v”. El valor de CTOD se establece teniendo en cuenta las componentes elásticas y plásticas del desplazamiento. En la Figura 3.4 se presenta una curva típica “Carga vs Desplazamiento”, en donde se puede ver que inicialmente la relación es lineal pero se desvía de la linealidad como consecuencia de la deformación plástica.

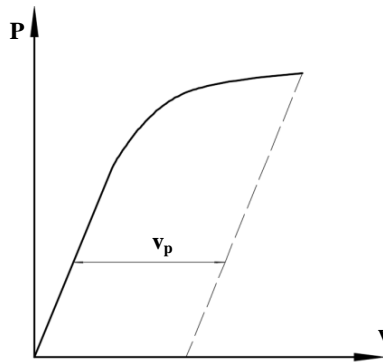


Figura 3.4: Diagrama típico Carga vs Desplazamiento de la apertura de la boca de fisura. Adaptada de (Aranda. J. L., 2002).

El método se basa en el cálculo por separado de las componentes elásticas y plásticas del CTOD

$$CTOD = \delta = \delta_{elástico} + \delta_{plástico} \quad (3.1)$$

La componente elástica viene dada por:

$$\delta_{elástico} = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{YS} \cdot E} \quad (3.2)$$

Donde:

K : Factor de intensidad de tensiones.

ν : Coeficiente de Poisson.

σ_{YS} : Tensión de fluencia.

E : Módulo de elasticidad.

La componente plástica (δ_p) del CTOD se calcula por relaciones geométricas, estas relaciones están basadas en el modelo “*plastic hinge*”, que establece que para fluencia generalizada, la probeta se deforma como dos brazos rígidos que giran alrededor de un

centro aparente de rotación “CR” ubicado delante de la punta de fisura, como se ilustra en la Figura 3.5.

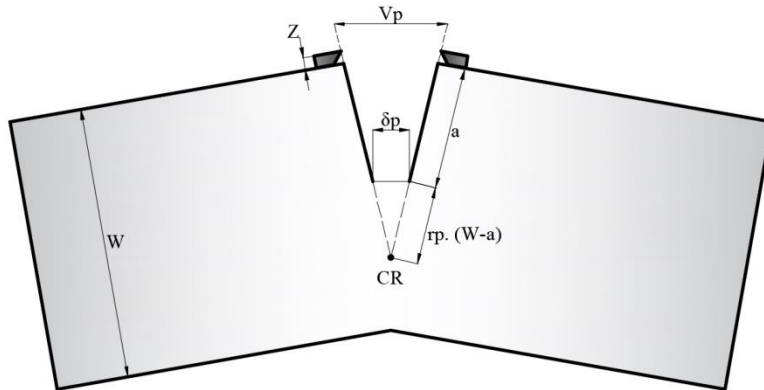


Figura 3.5: Modelo “*plastic hinge*”. Adaptada de (Anderson, 2017)

Mediante la construcción de triángulos semejantes, la componente plástica viene dada por:

$$\delta_{plástico} = \frac{r_p \cdot (W - a) \cdot V_p}{r_p \cdot (W - a) + a + z} \quad (3.3)$$

Donde:

r_p : Factor plástico rotacional. La norma ASTM E1290 establece un valor de 0,44.

z : Altura del clip.

3.1.3. La Integral de contorno J

La integral surge de una expresión establecida en el estudio de materiales elásticos no lineales en la Mecánica de Medios Continuos, y expresa la diferencia entre el trabajo de las fuerzas exteriores y la energía elástica acumulada a lo largo de un camino o curva “ Γ ”. Dicha integral es nula en cualquier contorno cerrado sin singularidades en su interior y su expresión en un elemento tipo placa sometido a un estado tensional plano es de la forma:

$$J = \int_{\Gamma} T_i \cdot u_i ds - \int_A w \cdot dA \quad (3.4)$$

Donde:

w : Densidad de energía por unidad de volumen.

T_i : Vector tracción.

u_i : Vector desplazamiento a lo largo de ds .

En 1968, Rice propuso la Integral J como sustitutiva de la tasa de liberación “G” propuesta por Griffith para la MFLE (Anderson, 2017). En su aplicación a la mecánica de la fractura “J” representa la liberación de energía (U), que bajo un estado de tensión determinado, acompaña a la propagación de la grieta una fracción (da), aún cuando la plasticidad en el frente de grieta fuera apreciable. Bajo esta definición se puede expresar “J” en términos de la energía necesaria para propagar la grieta y el área creada por la propagación de la misma, como (Anderson, 2017):

$$J = \frac{dU_{\text{para propagar la grieta}}}{dA_{\text{area de grieta creada}}} \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la tasa de liberación de energía al crecer una fisura un área (A) viene dada por la derivación de la Ecuación (3.4) a lo largo de un contorno cerrado que contenga el frente de fisura y toda la zona donde exista un grado de deformación plástica. Esto se ilustra en la Figura 3.6, y se expresa matemáticamente en la Ecuación (3.6)

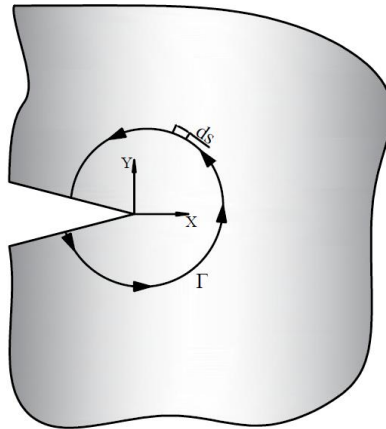


Figura 3.6: Contorno arbitrario en el frente de fisura para la determinación de J. Adaptada de (Aranda. J. L, 2002)

$$J = \frac{dU}{dA} = \frac{d \left[\int_{\Gamma} T_i \cdot u_i ds - \int_A w \cdot dA \right]}{da} \quad (3.6)$$

Aplicando a esta expresión el teorema de la divergencia, el principio de los trabajos virtuales y la derivación total se llega a la expresión (Aranda. J. L, 2002):

$$J = \int_{\Gamma} \left[W dy - T \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right] \quad (3.7)$$

Donde:

$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}$: Densidad de energía de deformación.

$T \frac{\partial u_i}{\partial x} ds$: Tasa de trabajo realizado por el campo de tensiones en el área encerrada por Γ .

La Ecuación (3.7) es conocida como “la integral J de Rice”. Esta expresión puede ser evaluada para para cualquier geometría y estado de carga. Además mediante el teorema de la divergencia se puede demostrar que el valor de “J” es independiente de la trayectoria Γ elegida.

Begley y Landes propusieron el parámetro J_{IC} como criterio de fractura elastoplástico. El mismo es el valor de J correspondiente al comienzo de crecimiento estable de fisura en un material elastoplástico y bajo un estado plano de deformaciones (Anderson, 2017). Entonces, habrá crecimiento de fisura si $J_I \geq J_{IC}$.

3.1.3.1. Determinación experimental de la integral J

Landes y Begley presentaron un método de evaluación de J, basado en la Ecuación (3.5), como (Anderson, 2017):

$$J = \frac{1}{B} \frac{\Delta U}{\Delta a} \quad (3.8)$$

Siendo B el espesor de la probeta. Para este método es necesario evaluar la energía potencial como el área bajo la curva “Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga”, en probetas con longitudes de fisuras diferentes, para poder evaluar los incrementos ΔU y Δa . La desventaja de este método radica en la necesidad de utilizar múltiples probetas, lo que en resulta en un proceso más complejo debido a la confección de las probetas y más costoso. En la Figura 3.7 se ilustra el procedimiento.

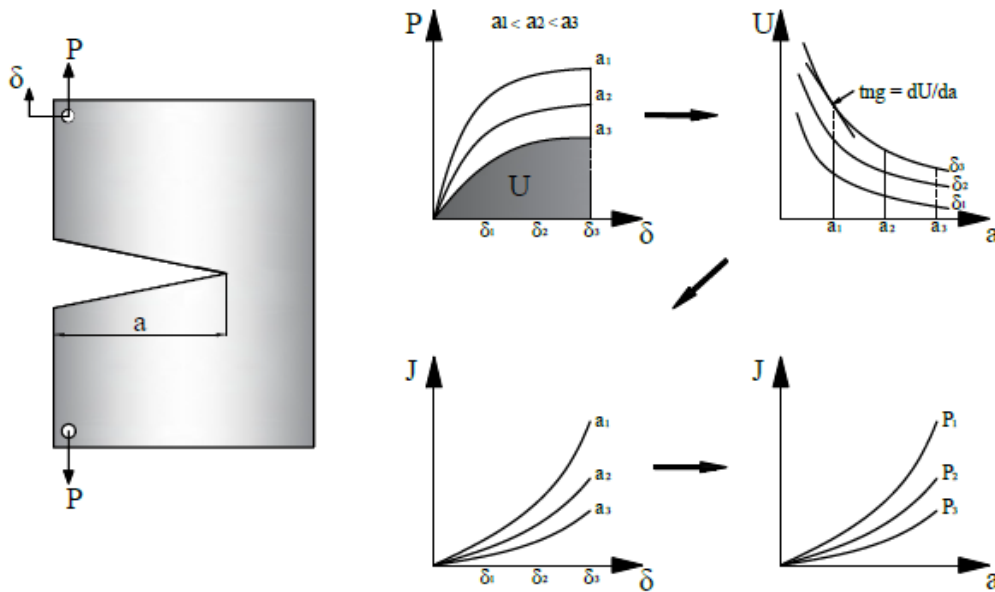


Figura 3.7: Procedimiento experimental para determinar J propuesto por Landes y Begley. Adaptada de (Aranda. J. L, 2002)

En 1973 Rice propuso un método para determinar J directamente a partir de la curva “Carga vs Desplazamiento” de una sola probeta sometida a flexión simple, como se muestra en la Figura 3.8. Si la probeta está sometida a un momento (M) se desplazara un ángulo (Ω), dicho desplazamiento se puede pensar en dos componentes por un lado un ángulo (Ω_{nc}) correspondiente al desplazamiento que se produciría si no existiese la fisura y un desplazamiento adicional (Ω_c) como consecuencia de que la placa se encuentra fisurada.

$$\Omega = \Omega_{nc} + \Omega_c \quad (3.9)$$

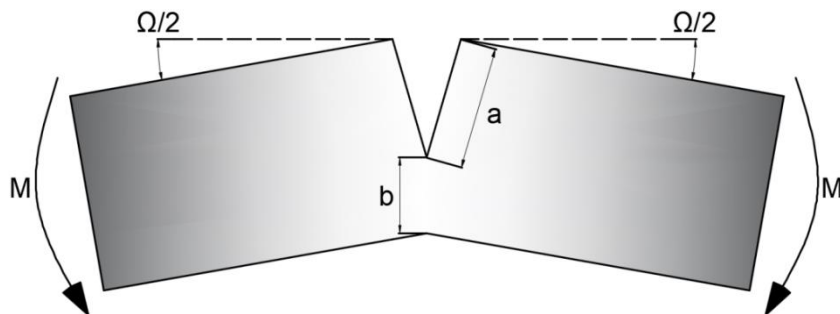


Figura 3.8: Probeta fisurada sometida a flexion simple. Adaptada de (Aranda. J. L, 2002)

Las fisuras son profundas por ende la zona donde ocurre la deformación plástica queda limitada al ligamento remanente, “b”, por lo que esta es la única longitud característica de la geometría y $\Omega_c \gg \Omega_{nc}$.

La energía absorbida por la probeta viene dada por:

$$U = \int_0^{\Omega} M. d\Omega \quad (3.10)$$

Para determinar J se debe derivar U respecto al área de la fisura. Al diferenciar, solamente Ω_c contribuye a la liberación de energía, ya que Ω_{nc} no es función del tamaño de fisura.

$$J = \int_0^M \left(\frac{\partial \Omega_c}{\partial a} \right) dM = - \int_0^M \left(\frac{\partial \Omega_c}{\partial b} \right) dM \quad (3.11)$$

Mediante un análisis dimensional se puede demostrar que (Perez Ipiña, 2004):

$$\Omega_c = F \left(\frac{M}{b^2} \right) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \Omega_c}{\partial b} = - \frac{2M}{b^3} F' \left(\frac{M}{b^2} \right) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \Omega_c}{\partial M} = \frac{1}{b^2} F' \left(\frac{M}{b^2} \right) \quad (3.14)$$

Diferenciando la Ecuación (3.12) respecto a “M” y a “b” y reemplazando en (3.11), la expresión resultante para J es la siguiente:

$$J = \frac{2}{b} \int_0^{\Omega_c} M. d\Omega \quad (3.15)$$

Cuyo término integral corresponde a la energía absorbida por la probeta.

En general, para una variedad de configuraciones, la integral J puede escribirse como:

$$J = \frac{\eta. U}{B. b} \quad (3.16)$$

Donde:

η : Coeficiente adimensional.

B : Espesor de la probeta.

b : Ligamento remanente.

U : Energía absorbida por la probeta.

La energía absorbida por la probeta tiene su componente elástica y su componente plástica por lo que la Ecuación (3.16) puede escribirse como:

$$J = \frac{\eta_{el} \cdot U_{el}}{B \cdot b} + \frac{\eta_{pl} \cdot U_{pl}}{B \cdot b} \quad (3.17)$$

3.1.3.2. Corrección de J por crecimiento estable

La Ecuación (3.16) fue deducida para fisuras de longitud constante, por lo que se comete un error al usarla en ensayos en donde la fisura crece de forma estable (Anderson, 2017). Cuanto mayor es el crecimiento de fisura, más importante es el error que se comete. Ernst propuso una ecuación incremental aproximada, para ensayos en los que la fisura crece de manera estable, la cual viene dada por (Perez Ipiña, 2004):

$$J_{i+1} = \left[J_i + \left(\frac{\eta}{b} \right)_i A_{i,i+1} \right] \left[1 - \left(\frac{\gamma}{b} \right)_i (a_{i+1} - a_i) \right] \quad (3.18)$$

Donde:

J_i : J para una longitud de fisura a_i .

$A_{i,i+1}$: Área bajo la curva carga-desplazamiento para las longitudes de fisura a_i y a_{i+1} .

η y γ : Son coeficientes adimensionales.

3.1.4. Curva de resistencia J-R

Para un cuerpo que posee una fisura, donde la fuerza impulsora de la fisura está caracterizada por medio de J, la curva J-R representa un contorno de condiciones de equilibrio donde la fisura permanece estable si la carga es detenida (Anderson, 2017). En la Figura 3.9 se muestra una curva típica de un material dúctil. En el inicio de la curva se produce el enromamiento de la punta de fisura y hay un crecimiento aparente, luego se produce el inicio de crecimiento físico, y la fisura crece de manera estable. Una medida de la tenacidad del material se puede obtener definiendo J_i , como el valor de J para el cual se da el inicio de crecimiento físico.

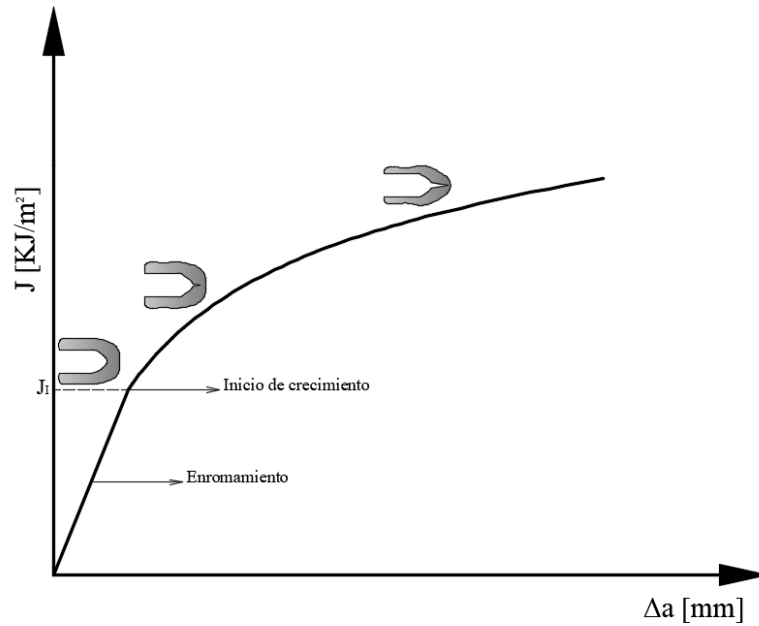


Figura 3.9: Curva de resistencia típica para un material dúctil. Adaptada de (Anderson, 2017)

Se desarrollará un crecimiento inestable si la fuerza impulsora, carga P , aumenta en mayor proporción que la resistencia al crecimiento de fisura, esto es cuando la carga es tangente a la curva R como se muestra en la Figura 3.10. Esto muestra que una fisura sometida a una carga estática puede crecer de manera estable sin alcanzar condiciones de inestabilidad. Por esto es que el parámetro J puede ser considerado como un criterio de fractura conservativo (Anderson, 2017).

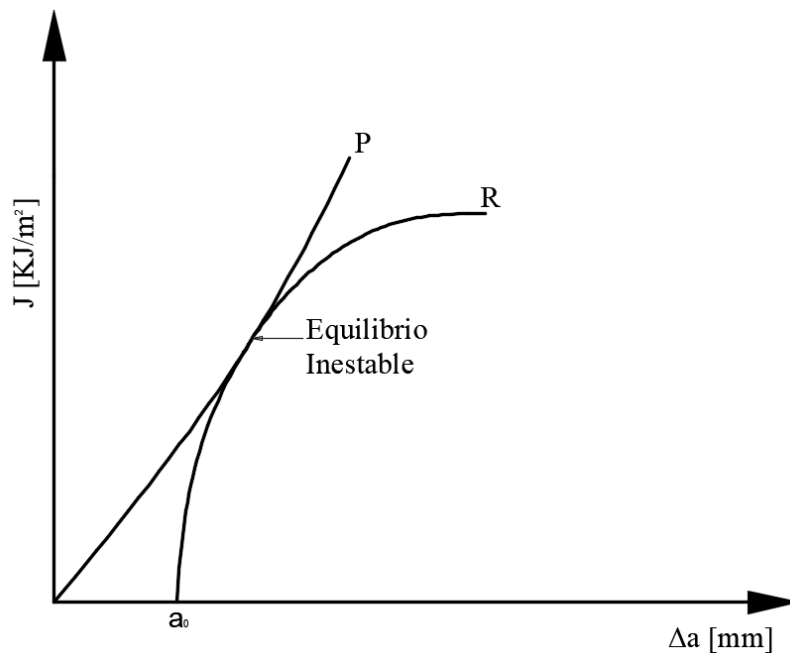


Figura 3.10: Condiciones de equilibrio entre la carga y la resistencia al crecimiento de fisura. Adaptada de (Aranda, J. L, 2002)

3.1.5. Medición del crecimiento estable de fisura.

Para construir la curva $J-R$ es necesario conocer el valor del crecimiento estable de fisura asociado a cada valor de J . Los métodos para determinar el crecimiento estable de fisura se pueden dividir en métodos de múltiples probetas, métodos en los que se utiliza una probeta para obtener cada par de valores $J-\Delta a$ necesarios para generar la curva $J-R$, y los más modernos, métodos de probeta única, en los cuales se puede determinar la curva $J-R$ completa a partir de una sola probeta. Entre los métodos de probeta única más utilizados se encuentran: el método de descargas parciales, el de caída de potencial eléctrico, métodos basados en el concepto de separabilidad de la carga y el del doble clip gauge.

Método descargas parciales

El método de descargas parciales consiste en generar pequeñas descargas de la probeta durante el ensayo, del orden del 10 % de la carga alcanzada, a diferentes valores de desplazamiento, esto dará como resultado porciones de rectas cuyas pendientes, “*Compliances*”, son función de la longitud de la fisura y la geometría de la probeta (Perez Ipiña, 2004).

Método de caída de potencial eléctrico

El método de caída de potencial eléctrico está basado en que las discontinuidades en un material perturban el campo eléctrico generado al hacer circular una corriente por el mismo. La magnitud de la perturbación es función del tamaño y forma de la discontinuidad, por lo que se puede determinar para una dada variación de tensión cuanto creció la fisura (Perez Ipiña, 2004).

Métodos basados en el concepto de separabilidad de la carga:

Estos métodos se basan en que, durante un ensayo de fractura de una probeta fisurada, la carga P , para un material, geometría y restricción definidos, estará representada por dos funciones independientes: la función geométrica “ G ” y la función de deformación del material “ H ”. A este tipo de métodos pertenece el método de Normalización de la Carga que se plantea en este trabajo, y que se explica en detalle más adelante.

Método del doble clip gauge (DCG)

El DCG está basado en el modelo de bisagra plástica “*plastic hinge*” que establece que para las componentes plásticas del desplazamiento la probeta se comporta como dos brazos rígidos que rotan alrededor de un centro de rotación (CR). El método consiste en medir la apertura de la boca de la fisura, V_1 y V_2 , a dos distancias diferentes del CR. Mientras no haya crecimiento de fisura los desplazamientos son proporcionales, pero al comenzar el crecimiento, el CR se desplaza y el registro se curva (Manziona & Perez Ipiña, 1991). El método permite, mediante la Ecuación (3.19), determinar indirecta y continuamente la longitud de fisura (a), a partir de variación de la pendiente (V), obtenida de la curva que relaciona los desplazamientos V_2 vs. V_1 . Donde V es V_1/V_2 . En la Figura 3.11 se ilustra el método del DCG.

$$a = \frac{Z_1 - Z_2 V - r_p \cdot W(1 - V)}{(1 - r_p)(V - 1)} \quad (3.19)$$

Donde:

V_1 : Medición del desplazamiento de apertura de la boca de fisura.

V_2 : Medición del desplazamiento de apertura del frente de fisura.

Z_1, Z_2 : Distancia desde la boca de fisura a cada extensómetro.

W : Altura de la probeta.

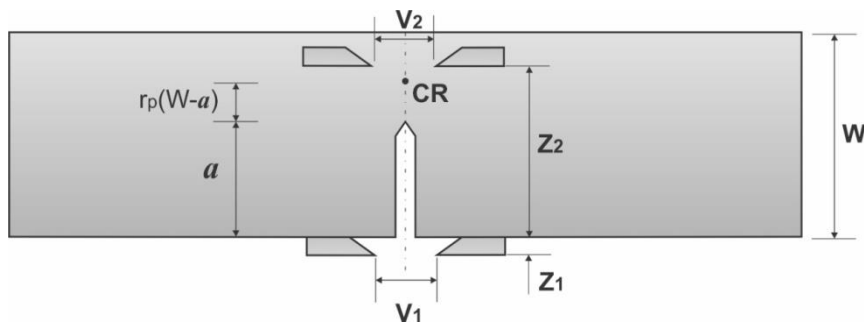


Figura 3.11: Instrumentación del método del Doble Clip Gauge. Adaptada de (Manziona & Perez Ipiña, 1991)

En esta sección se expusieron dos parámetros fundamentales para el análisis elastoplástico de una fisura: el CTOD y la integral de contorno J . Además se presentaron los fundamentos teóricos sobre los cuales se basan los lineamientos establecidos en las normas, en particular la ASTM E 1820, para determinar valores de la integral J , como así también la curva de resistencia $J-R$. Por otro lado, se presentaron los métodos más utilizados para medir el crecimiento estable de fisura y se desarrolló el método del DCG, el cual fue utilizado en el presente trabajo.

3.2. Generación de Emisión Acústica durante la fractura

3.2.1. Introducción

La Emisión Acústica (EA) es una técnica de ensayo no destructivo capaz de captar las ondas elásticas que se propagan a través de un material, producto de una liberación espontánea de energía, situación que ocurre durante el crecimiento de una fisura. En general el método para analizar las señales de emisión acústica puede dividirse en dos grupos: análisis de parámetros y el análisis de formas de onda. Normalmente el análisis de parámetros es insuficiente para caracterizar completamente la fuente de emisión acústica, mientras que el análisis de forma puede proporcionar información más completa, pero requiere más tiempo y no es en tiempo real (Grosse C.U. & Linzer L.M., 2008). Para abordar los objetivos planteados en este trabajo se utilizó el análisis de parámetros para identificar el inicio de crecimiento de fisura, a su vez se realizó un breve análisis de la forma de onda para este evento. En lo que sigue se presentan los fundamentos físicos de la EA, los tipos de señales que se pueden generar y los parámetros que las caracterizan.

3.2.2. Fundamento físico

El fenómeno de emisión acústica es producido como consecuencia de la liberación espontánea de energía elástica almacenada dentro del material cuando este es sometido a un cierto nivel de esfuerzo. Esta energía se propaga a través del material como ondas elásticas transitorias. Los tipos de ondas más comunes que aparecen en un medio sólido y elástico son: longitudinales, transversales, superficiales (ondas de Rayleigh), u ondas de Lamb. La técnica de la EA se basa en la detección de dichas ondas elásticas mediante sensores piezoeléctricos.

La Figura 3.12 ilustra la generación de ondas elásticas por una fuente de EA, producidas al someter el material a un estado tensional, y cómo estas ondas pueden ser registradas.

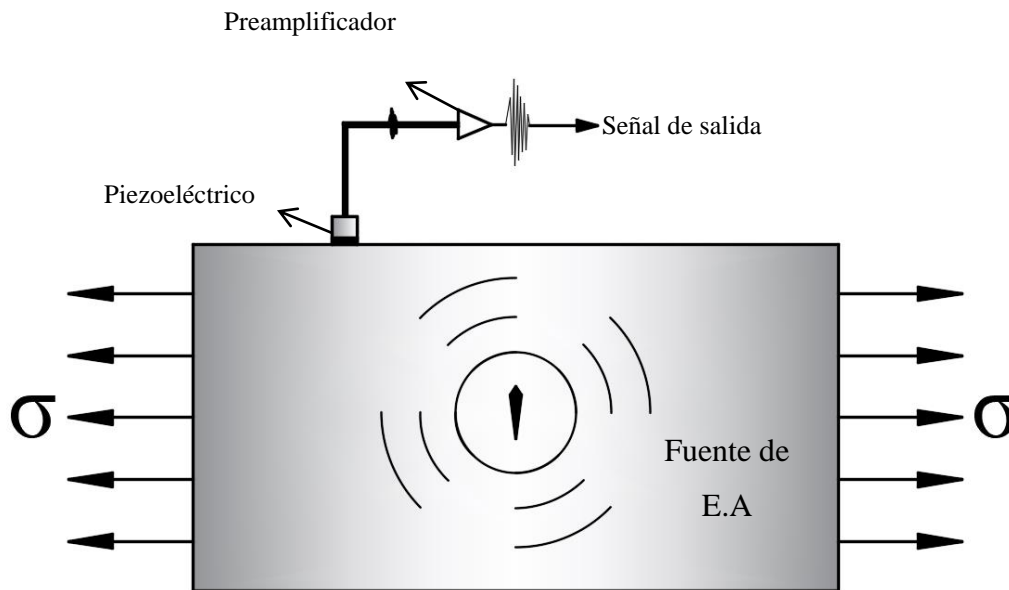


Figura 3.12: Fuente de E.A generando ondas elásticas. Adaptada de (Grosse C.U. & Linzer L.M., 2008)

Cuando un material metálico que contiene una fisura, fuente de E.A, es sometido a una carga creciente, este responde en tres etapas: En primer lugar, el material que rodea la punta de fisura se deforma plásticamente, la deformación plástica es producida por la formación y movimiento de dislocaciones, ambos fenómenos están acompañados por la generación de ondas elásticas (Fitzgerald E.R., 1960). Luego hay un desplazamiento del frente de grieta, creando nuevas superficies. Esto se conoce como crecimiento estable. Finalmente, la fisura llega a su longitud crítica y se produce lo que se conoce como crecimiento inestable (Fitzgerald E.R., 1960). En el presente trabajo se pondrá principal atención en las señales de E.A que se generan durante la primera y segunda etapa.

3.2.3. Señales de Emisión Acústica

Una vez que la onda elástica ha sido captada por el sensor piezoeléctrico, ésta se convierte en una señal de EA, medida en voltios (V). Existen dos tipos de señales de emisión acústica: señales transitorias y señales continuas. La Figura 3.13 muestra un ejemplo de cada una de ellas. A diferencia de las transitorias, las señales continuas no muestran un comienzo y un final bien marcado. Estas son características de procesos de fricción, flujo de fluidos o fugas en recipientes. Las señales transitorias se generan, por ejemplo, por el crecimiento de fisuras activas o roturas de fibras en materiales compuestos. Dado que las señales que se registran durante la propagación de una fisura son de carácter transitorio, se pondrá principal atención en este tipo de señales.

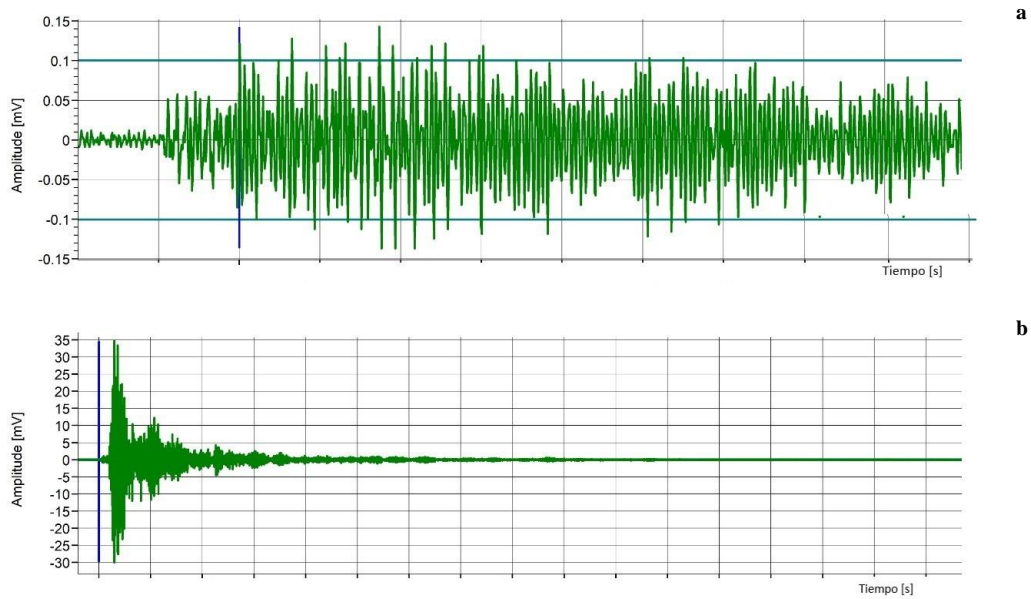


Figura 3.13: Representación de una señal de E.A. a) Señal continua, b) Señal transitoria. –Imagen extraída del Software Vallen.

3.2.4. Parámetros de una señal transitoria de E.A

Las señales transitorias tienen un inicio y un final bien marcado respecto del ruido de fondo y por lo tanto una duración bien definida. Los parámetros que caracterizan una señal transitoria de EA son: amplitud, tiempo de llegada, tiempo de subida, duración, cuentas, y energía. En la Figura 3.14 se ilustra una señal transitoria con sus respectivos parámetros.

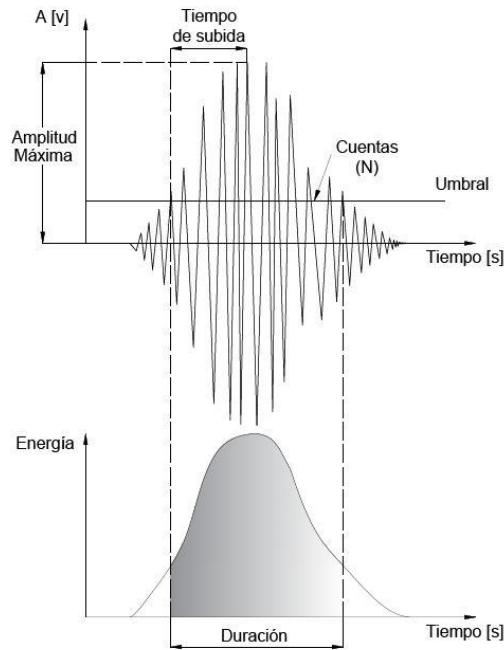


Figura 3.14: Señal transitoria de E.A y sus parámetros característicos

Amplitud (A): Es el valor del máximo voltaje alcanzado por la señal. Normalmente la amplitud se expresa en decibeles de emisión acústica (dB_{EA}) como:

$$A (dB_{EA}) = 20 \cdot \log \frac{V_p}{V_r} \quad (3.20)$$

Siendo V_p el voltaje pico de la señal a la entrada del preamplificador en μV y V_r un voltaje de referencia de $1 \mu V$.

Tiempo de subida: Es el tiempo que tarda la señal en alcanzar el voltaje pico desde que se da el primer cruce de umbral. Este parámetro se aplica para problemas dinámicos que dependen del tiempo como análisis de vibraciones o eliminación de ruidos.

Umbral: El umbral de detección es un voltaje establecido por el operador, el cual establece cuando se comienza a registrar un evento “hit”. Para que un hit sea registrado debe superar el umbral de detección.

Cuentas (N): Es el número de veces que la señal cruza el umbral en una polaridad, debido a su dependencia con el umbral este parámetro ha sido sustituido en gran medida por la energía de la señal.

Duración (D): Intervalo de tiempo transcurrido entre el primer y último cruce de umbral.

Energía: Existen dos maneras de medir la energía de una señal transitoria de E.A, energía MARSE y Energía verdadera.

MARSE (por su acrónimo en inglés: Measured Area under Rectified Signal Envelope): definida como la integral de la tensión rectificadora de la señal de emisión acústica durante la duración de la señal, sus unidades son V.s

$$MARSE = \int_D V_r(t) dt \quad (3.21)$$

Donde V_r es la envolvente de la señal rectificadora de E.A.

Energía verdadera:

$$E = \frac{1}{R} \int_D |V(t)|^2 dt \quad (3.22)$$

Donde $V(t)$ es la envolvente de la señal rectificadora a la salida del sensor y R es una resistencia de referencia, habitualmente de 10 kΩ. Sus unidades son Joules.

Una forma de representar la energía es la energía acumulada, la cual muestra la suma de la energía de cada evento de E.A registrado.

La energía de E.A es una herramienta eficaz para la identificación de fuentes, generalmente refleja la intensidad de la misma (Gu A. & Sun L., 2019). Además presenta la ventaja de ser poco sensible al umbral de detección. Debido a la baja sensibilidad respecto al umbral de detección, es que: la energía de EA, la energía acumulada y la amplitud fueron los parámetros seleccionados para realizar el análisis de parámetros sobre las señales que se captaron durante los ensayos.

3.3. Estándares establecidos en la norma ASTM E1820

3.3.1. Introducción

Los métodos propuestos por Rice, Paris y Merkle por un lado, sumado al método de Landes y Begley y las correcciones realizadas por Ernst, fueron la base para la normalización de los métodos utilizados en la determinación experimental de J . En particular, la norma ASTM E1820 cubre procedimientos para la determinación de la tenacidad a la fractura de materiales metálicos utilizando los parámetros K , J y CTOD. La tenacidad se puede determinar en el formato de la curva J - R o como un valor único. La tenacidad a la fractura determinada con estos procedimientos es para el Modo I de apertura. Este método de prueba se desarrolló para proporcionar un procedimiento común para determinar todos los parámetros de tenacidad mediante una única probeta. La norma distingue el procedimiento de ensayo y cálculos según las diferentes geometrías de probeta. En este trabajo se utilizó la configuración de flexión en tres puntos, SE(B), por su acrónimo en inglés Single Edge Bend, la cual se detalla a continuación. Además, se detalla el método de normalización, también incluido en la norma y utilizado en este trabajo.

3.3.2. Ensayo de flexión sobre probetas SE(B)

3.3.2.1. Dimensiones básicas de la probeta

En la Figura 3.15 se esquematiza una probeta estándar del tipo SE(B) con sus dimensiones básicas (B), (W) y la distancia entre apoyos (S). Un requisito para este tipo de probetas es que $1 \leq W/B \leq 4$. En el caso de que la probeta cuente con ranuras laterales se define el espesor neto B_N .

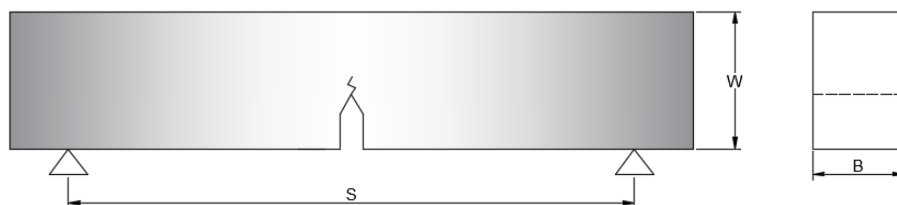


Figura 3.15: Dimensiones básicas de una probeta SE(B).

3.3.2.2. Cálculo de J como un valor único

Para una probeta SE(B), J puede calcularse como

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3.23)$$

Donde:

J_{el} : Componente elástica de J.

J_{pl} : Componente plástica de J.

Para un punto del registro “Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga” ($P_i; v_i$), la componente elástica de la integral J viene dada como:

$$J_{el} = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (3.24)$$

K representa el factor de intensidad de tensiones y viene dado por :

$$K = \left[\frac{P_i S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \right] \cdot f \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (3.25)$$

Donde:

$$f \left(\frac{a_0}{W} \right) = \frac{3 \left(\frac{a_0}{W} \right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a_0}{W} \right) \left(1 - \frac{a_0}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a_0}{W} \right) + 2,7 \left(\frac{a_0}{W} \right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a_0}{W} \right) \left(1 - \frac{a_0}{W} \right)^{3/2}} \quad (3.26)$$

a_0 : Longitud inicial de fisura.

E : Módulo de elasticidad.

ν : Coeficiente de Poisson.

La componente plástica se calcula como:

$$J_{pl} = \frac{\eta_{pl} A_{pl}}{B_N b_0} \quad (3.27)$$

Donde

A_{pl} : Área debajo de la curva carga- desplazamiento, ver Figura 3.16.

η_{pl} : Constante adimensional.

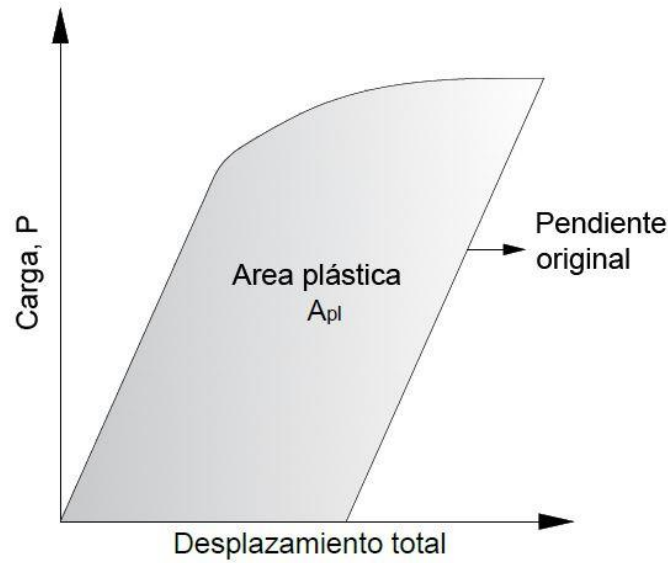


Figura 3.16: Definición del área utilizada en el cálculo de J mediante el método básico.

3.3.2.3. Cálculo de J mediante el método de la curva de resistencia

Para un punto del registro “Carga vs Desplazamiento” ($P_i; v_i$), el cual se corresponde con una longitud de fisura a_i el valor de J se calcula como:

$$J_i = \frac{K_i^2(1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (3.28)$$

Donde K se calcula con la Ecuación (3.25) para cada a_i , y $J_{pl(i)}$ se determina como:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \left(\frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right) \right] \left[1 - \gamma_{pl(i-1)} \left(\frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \right] \quad (3.29)$$

$J_{pl(i)}$ representa la componente plástica de J corregida por el crecimiento estable de fisura, como fue explicado en la sección 3.1. El término $A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$ de la Ecuación (3.29) representa el incremento de área plástica bajo “la curva “Carga vs Desplazamiento plástico” entre los punto $i - 1$ e i , como se muestra en la Figura 3.17 y se determina mediante la Ecuación (3.30).

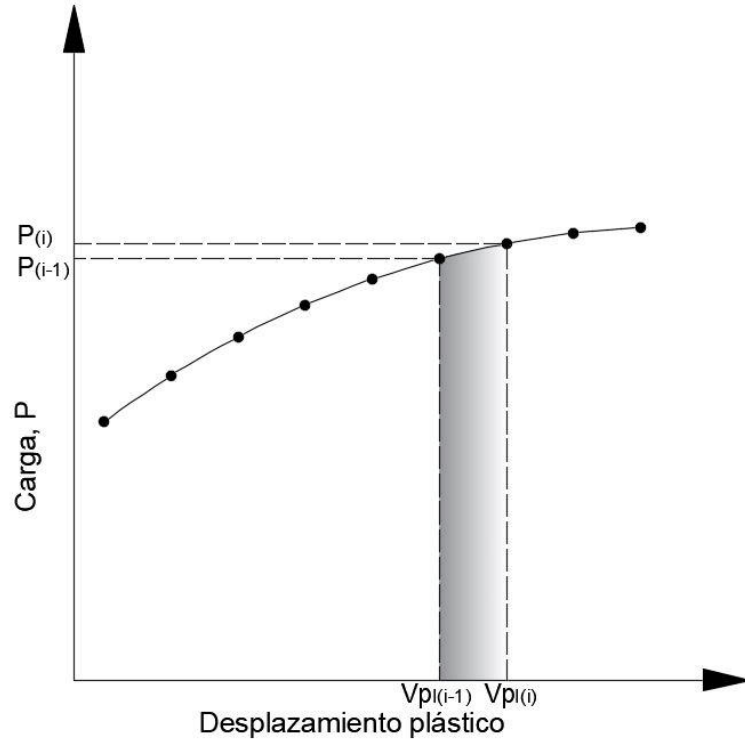


Figura 3.17: Definición del área plástica para el cálculo de J mediante la curva de resistencia.

$$A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)} = [P_{(i)} + P_{(i-1)}] [V_{pl(i)} - V_{pl(i-1)}] / 2 \quad (3.30)$$

Donde:

V_{pl} : Componente plástica del desplazamiento del punto de aplicación de la carga ó componente plástica del desplazamiento del frente de grieta.

$$V_{pl(i)} = v_i - (C_i P_i) \quad (3.31)$$

En la cual:

C_i : Relación entre el incremento de desplazamiento y el incremento de fuerza $\Delta v_i / \Delta P_i$ denominado “Compliance”.

El parámetro de “Compliance” depende de la geometría de la probeta y de la configuración del ensayo. Para probetas de flexión en tres puntos y en función del registro del desplazamiento del punto de aplicación de la carga, la expresión para C_i es:

$$C_i = \frac{1}{EB_e} \left(\frac{S}{W-a_i} \right)^2 \left[1,193 - 1,98 \left(\frac{a_i}{W} \right) + 4,478 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 4,443 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + 1,739 \left(\frac{a_i}{W} \right)^4 \right] \quad (3.32)$$

En tanto que para la misma geometría de probeta y cuando se registra es el desplazamiento de la apertura de la boca de la fisura, C_i viene dado por:

$$C_i = \frac{6S}{EWB_e} \left(\frac{a_i}{W} \right) \left[0,76 - 2,28 \left(\frac{a_i}{W} \right) + 3,87 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 2,04 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + \frac{0,66}{\left(1 - \frac{a_i}{W} \right)^2} \right] \quad (3.33)$$

Para probetas con entallado lateral, recurso que permite generar un estado plano de deformaciones en todo el frente de fisura, se utiliza un valor de espesor efectivo:

$$B_e = B - (B - B_N)^2/B \quad (3.34)$$

Determinación de la curva J-R

Una vez calculado el valor de J para cada punto del registro “Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga” y determinados los correspondientes valores de extensión de fisura (a_i) para cada punto, se podrá determinar la curva J-R. Los valores de J y de crecimiento están delimitados por J_{max} y Δa_{max} , “rectángulo de validez”, como se muestra en la Figura 3.18

Donde J_{max} y Δa_{max} vienen dados por:

$$J_{max} = \text{Min} \left[b_0 \sigma_Y / 10; B \sigma_Y / 10 \right] \quad (3.35)$$

$$\Delta a_{max} = 0,25 b_0 \quad (3.36)$$

Donde σ_Y es el promedio entre la tensión de fluencia (σ_{YS}) y la tensión última (σ_{TS})

$$\sigma_Y = \frac{\sigma_{YS} + \sigma_{TS}}{2} \quad (3.37)$$

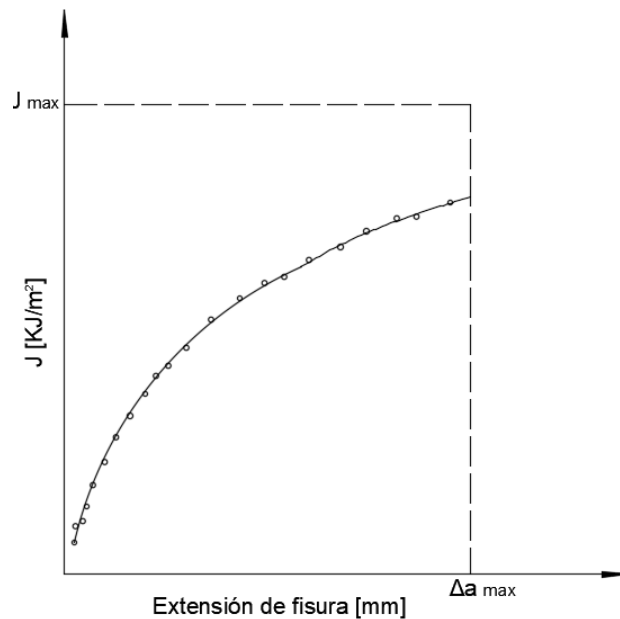


Figura 3.18: Rectángulo de validez para la curva de resistencia.

Para construir la curva J-R se procede como se detalla a continuación

1. Para cada valor de a_i registrado calcular el Δa_i correspondiente como

$$\Delta a_i = a_i - a_0 \quad (3.38)$$

2. Graficar J vs Δa
3. Determinar la línea de construcción, “*Blunting Line*”, como:

$$J = 2\sigma_Y \Delta a \quad (3.39)$$

4. Graficar la *Blunting line* y luego trazar de manera paralela la línea de exclusión hasta que corte al eje de las abscisas en 0,15 mm, (Línea 0,15). Trazar una segunda línea de exclusión hasta que corte al eje de las abscisas en 1,5 mm, (Línea 1,5). Por último trazar la recta $J_{\text{limite}} = b_0 \sigma_Y / 7,5$. Ver Figura 3.19.
5. Con los puntos (J, Δa) que se encuentran en el área encerrada por estas tres rectas se determina la curva J-R, utilizando el método de los mínimos cuadrados para realizar una regresión lineal del tipo:

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left(\frac{\Delta a}{k} \right) \quad (3.40)$$

Donde k es igual a 1 mm o 0,0394”

6. Una vez determinadas las constantes C_1 y C_2 , J_i viene dada por

$$J_i = C_1 * \left(\frac{\Delta a_i}{k} \right)^{C_2} \quad (3.41)$$

Función que representa la curva J-R para el material bajo análisis, Figura 3.19.

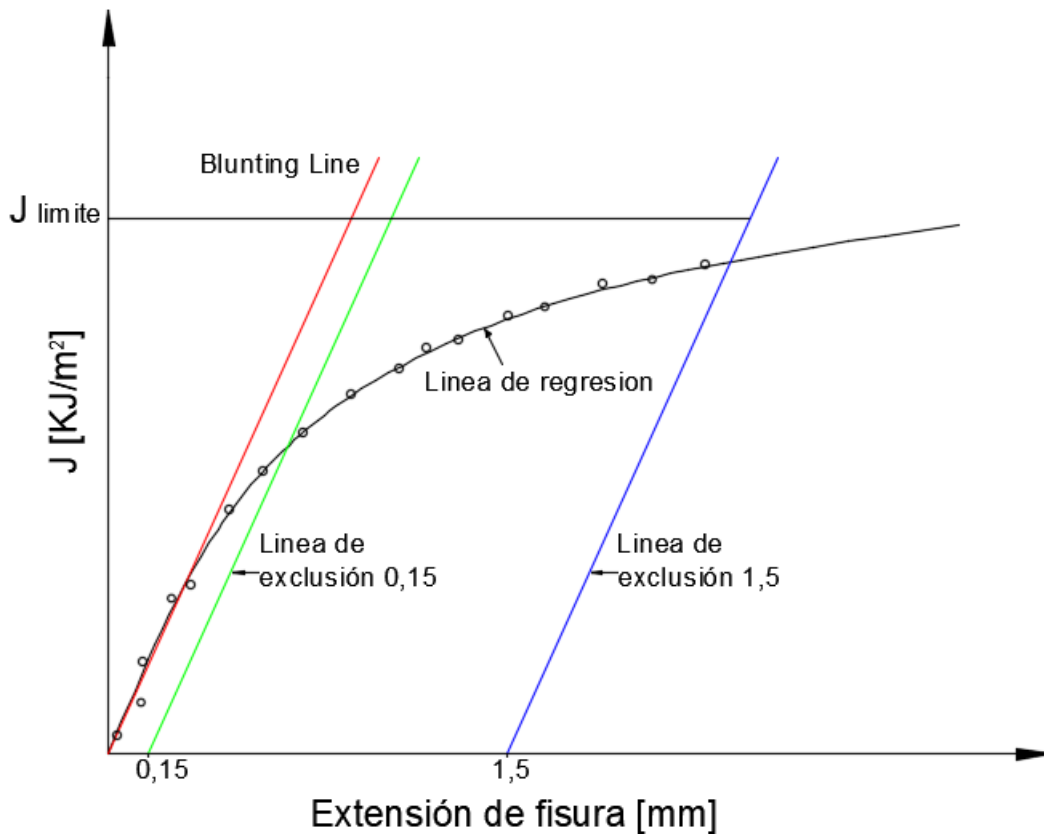


Figura 3.19: Definición de las líneas de construcción y exclusión para la selección de los datos utilizados en la regresión lineal.

3.3.3. Método de Normalización

El método de normalización es una técnica desarrollada para obtener la curva de resistencia $J-R$ a partir del registro “Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga” (P vs DPC) sin necesidad de registrar el crecimiento de fisura con un método adicional.

Este método evolucionó a partir de los primeros trabajos de Ernst (Ernst H. & Paris P., 1979) donde desarrolló el concepto de una curva llave “*key curve*”. Las curvas llaves representan el comportamiento de la carga frente al desplazamiento para una probeta de geometría particular y una longitud de fisura constante. Este trabajo inicial llevó al concepto de que la carga, en el intervalo plástico, podía representarse como una función separable con dos variables independientes, la longitud de fisura y el desplazamiento. Herrera y Landes usaron esto para formar la base del método de normalización (Herrera R. & Landes J. D., 1990).

El método de normalización se basa en el concepto de representar la carga como el producto de una función “ G ” que depende de la geometría de la fisura y una función

“ H ” que depende únicamente del desplazamiento plástico, como se muestra en la Ecuación (3.42)

$$P = G\left(\frac{a}{W}\right) * H\left(\frac{V_{pl}}{W}\right) \quad (3.42)$$

Donde:

P: Carga.

a: Longitud de fisura.

V_{pl} : Desplazamiento plástico.

W: Ancho de la probeta.

Una carga normalizada (P_N) que sea función únicamente del desplazamiento plástico puede ser definida como:

$$P_N = \frac{P}{G\left(\frac{a}{W}\right)} = H\left(\frac{V_{pl}}{W}\right) \quad (3.43)$$

La función $G\left(\frac{a}{W}\right)$ puede ser determinada como (Herrera R. & Landes J. D., 1990):

$$G\left(\frac{a}{W}\right) = BW\left(\frac{W-a}{W}\right)^{n_{pl}} \quad (3.44)$$

Entonces si $H\left(\frac{V_{pl}}{W}\right)$ es conocido, se puede determinar la longitud de fisura que hace que $P/G = H$.

Se han estudiado varias formas funcionales para la función de plasticidad “ H ” (Landes J. D. & Zhou Z., 1991). Actualmente la norma ASTM E-1820, en su Anexo 15, propone la siguiente expresión para la función de plasticidad

$$P_N = H\left(\frac{V_{pl}}{W}\right) = \frac{a + b\left(\frac{V_{pl}}{W}\right) + c\left(\frac{V_{pl}}{W}\right)^2}{d + \frac{V_{pl}}{W}} \quad (3.45)$$

Donde a, b, c, d son constantes de ajuste.

3.3.3.1. Aplicación del método de Normalización

A continuación se presenta, de manera resumida, el procedimiento para aplicar el método de normalización, tal como se implementa en la norma ASTM E-1820.

1. Normalizar los datos de carga P_i , exceptuando la carga máxima, usando la corrección por crecimiento aparente de fisura mediante a_{bi} , en la Ecuación (3.46)

$$P_{Ni} = \frac{P_i}{BW \left(\frac{W - a_{bi}}{W} \right)^{\eta_{pl}}} \quad (3.46)$$

$$a_{bi} = a_0 + \frac{J_i}{2\sigma_Y} \quad (3.47)$$

Donde J_i se calcula mediante la Ecuación (3.28), para la longitud de fisura a_0 .

2. Normalizar el punto de máximo desplazamiento utilizando la longitud final de fisura, este punto se denomina “punto de anclaje”.
3. Cada punto del desplazamiento de la línea de carga, V_{pl} , se normaliza mediante la expresión:

$$V'_{pli} = \frac{V_{pl}}{W} = \frac{v_i - (C_i P_i)}{W} \quad (3.48)$$

Donde C_i se determina para a_{bi} .

4. Trazar la curva P_{Ni} vs V'_{pli} .
5. Trazar una línea desde el punto de anclaje tangente a la curva de carga normalizada. Excluir todos los puntos entre el punto tangente y el punto de anclaje. Además excluir todos los puntos tales que $\frac{V_{pl}}{W} \leq 0,001$. Esto se debe a que la separabilidad de la carga en la que se basa el método de normalización deja de ser válida para desplazamiento plásticos muy pequeños.
6. Ajustar los datos resultantes del punto 3 con la función de normalización, Ecuación (3.45), y obtener los valores de las constantes de ajuste.
7. Determinar la longitud de fisura que hace que la carga normalizada sea igual a la función de ajuste.
8. Generar la curva $J-R$ con los valores obtenidos para la longitud de fisura en el punto 7.

En esta sección se presentaron los métodos, establecidos en la norma ASTM E1820, que se utilizaron en este trabajo. En lo que sigue, se desarrolla el procedimiento experimental, los resultados, y las conclusiones que resultaron de los ensayos sobre tres probetas de acero ASTM A514 Gr T con un trabajado en frío previo.

4. DESARROLLO

4.1. Procedimiento experimental

4.1.1. Introducción

Debido a la falta de requisitos metodológicos para la aplicación de la emisión acústica en el estudio del campo de la mecánica de fractura, fue necesario establecer un procedimiento experimental para garantizar la replicabilidad de los ensayos. En esta sección se desarrolla el procedimiento experimental utilizado para realizar el registro de los datos durante un ensayo de flexión en tres puntos sobre una probeta prefisurada SB (E).

Para la realización de los ensayos se siguieron los siguientes pasos:

1. Dimensionamiento y caracterización química de las probetas
2. Montaje e instrumentación de la probeta
3. Aplicación de la carga y registro de datos
4. Teñido térmico y medición de crecimiento estable “ Δa ”
5. Determinación de las propiedades mecánicas del material
6. Caracterización de la microestructura

4.1.2. Dimensionamiento y composición química

Como primer paso se procedió a tomar las dimensiones básicas de las probetas y a determinar la composición química del material. En la Tabla 4.1 se presentan los valores de B y W para cada probeta. La caracterización química del material se realizó mediante una espectrometría de emisión óptica, con un equipo Oxford PMI- MASTER perteneciente al Área de Diseño Mecánico del DME. La composición química de cada probeta se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Dimensiones básicas de las probetas y su relación W/B.

	B [mm]	W [mm]	W/B
Probeta 1	12,7	24,3	1,91
Probeta 2	12,6	25,2	2
Probeta 3	12,9	25	1,93

Tabla 4.2: Composición química de las probetas ensayadas [% en peso].

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Probeta 1	0,081	0,16	1,53	0,016	0,005	0,006	0,189
Probeta 2	0,085	0,16	1,61	0,016	0,004	0,008	0,181
Probeta 3	0,088	0,18	1,49	0,005	0,003	0,0129	0,184

4.1.3. Montaje e instrumentación de la probeta

Para realizar el ensayo se requirió montar las probetas sobre dos rodillos, separados 120 mm ($S = 120$ mm), de tal modo que el centro de la probeta quedara alineado con el punto de aplicación de la carga. De esta manera nos aseguramos que durante el ensayo no existan tensiones de corte sobre la fisura y que el modo de propagación sea Modo I. Además las probetas fueron instrumentadas con dos clips para la aplicación del método del doble clip (DCG) y con dos sensores piezoeléctricos para el registro de las señales de emisión acústica. La Figura 4.1 muestra un esquema del montaje e instrumentación de las probetas.

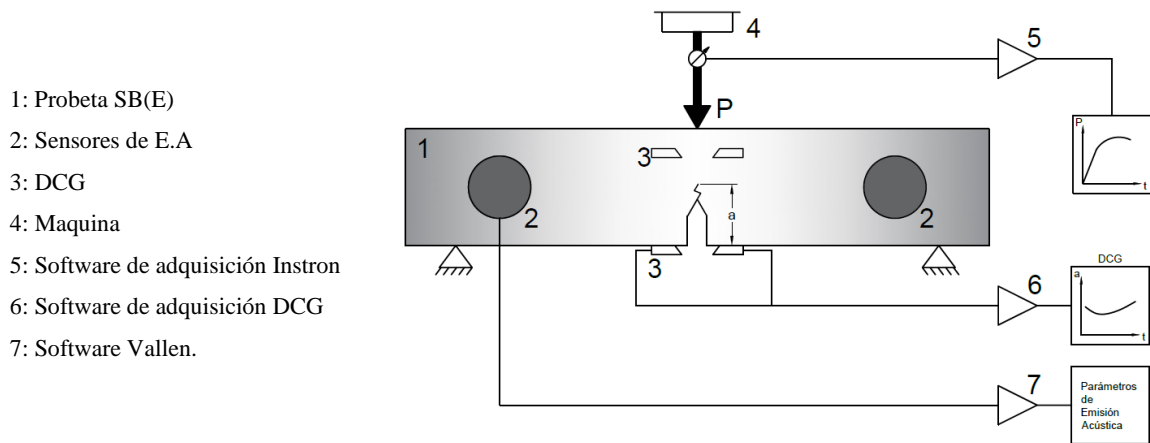


Figura 4.1: Esquema de la instrumentación utilizada en la adquisición de datos.

4.1.4. Aplicación de la carga y registro de datos

Para la aplicación de la carga se utilizó una máquina INSTRON-EMIC-23-30, perteneciente al Centro de Ciencia y Tecnología de Materiales (CeCiTeMa) de la FAIN. El registro de las señales de emisión acústica se realizó mediante sensores piezoeléctricos VS-150 RIC, resonantes de 150 KHz con un preamplificador integrado de 34 dB y un equipo AMSY-6 ambos de la marca Vallen, del Grupo OAT. El DCG se registró con un sistema de adquisición de datos del CeCiTeMa compuesto por una placa de adquisición CIO-DAS 1602-16 de 16 bits y una placa expansora CIO-EXP-GP, mediante la cual se realiza el acondicionamiento de señal. El registro, tanto de las señales de carga y desplazamiento, realizado con el sistema interno de la Máquina Universal de Ensayo (MUE), y el software Blue Hill®, como las señales del DCG y la E.A se hizo en simultáneo. En la Figura 4.2 se muestra el instrumental momentos antes de iniciar el ensayo

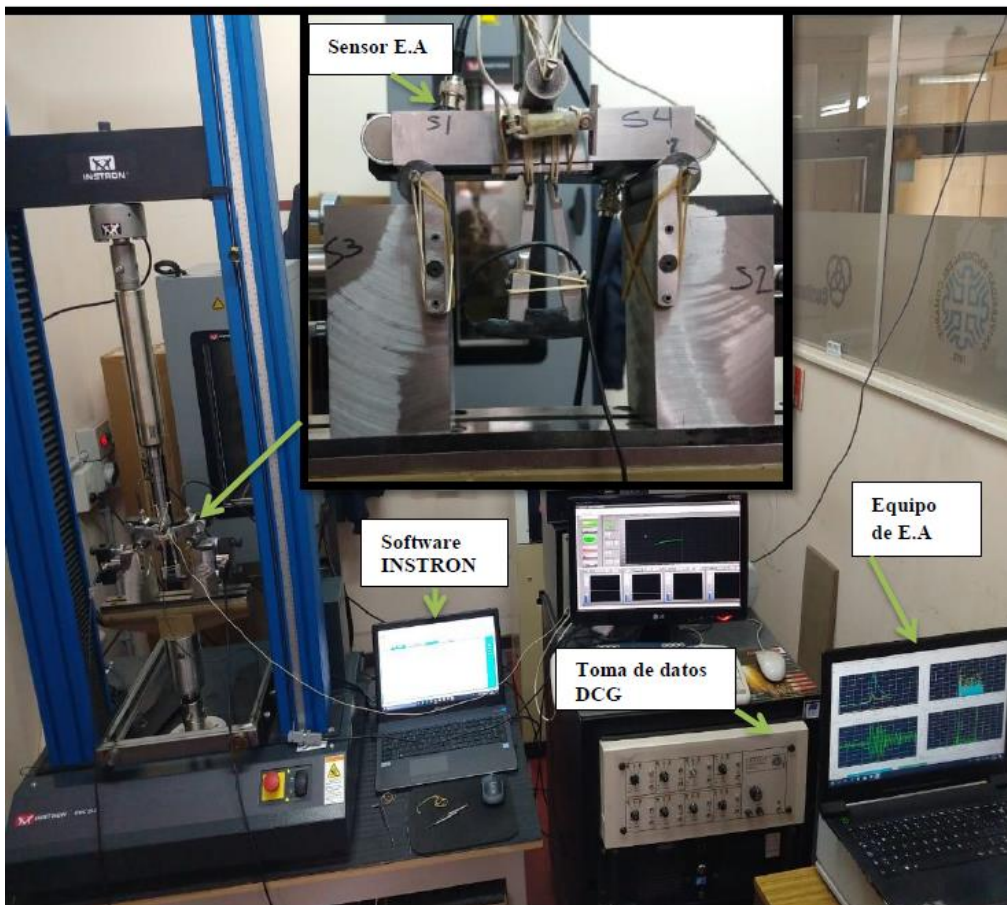


Figura 4.2 : Equipamiento utilizado para la realización de los ensayos.

4.1.5. Teñido térmico y medición de Δa

Los ensayos se realizaron en condiciones normales de presión y temperatura y a una velocidad de desplazamiento del cabezal móvil de 2 mm/min. Los mismos se desarrollaron hasta que se registró un decaimiento de la carga con evidencia de crecimiento estable de fisura sobre la probeta. Acto seguido se realizó un teñido térmico, técnica que permite revelar el crecimiento de fisura generado durante el ensayo y que consiste en calentar la probeta a 300 °C durante 15 minutos. En efecto, después de esta operación se terminó de romper cada probeta y en sendas mitades quedó en evidencia el crecimiento estable de fisura (Δa), tal como se aprecia en la Figura 4.3 Una vez hecho esto mediante un software para el procesamiento de imágenes “IMAGE J”, y siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM E1820, se midieron la longitud de fisura inicial (a_0) y final (a_f). Con la longitud inicial determinada se determinó el valor inicial del ligamento remanente (b_0) ($b_0=W-a_0$), esta magnitud es requerida en el cálculo de la integral J. En la Tabla 4.3 se presentan los valores de a_0 , a_f y b_0 para cada probeta.

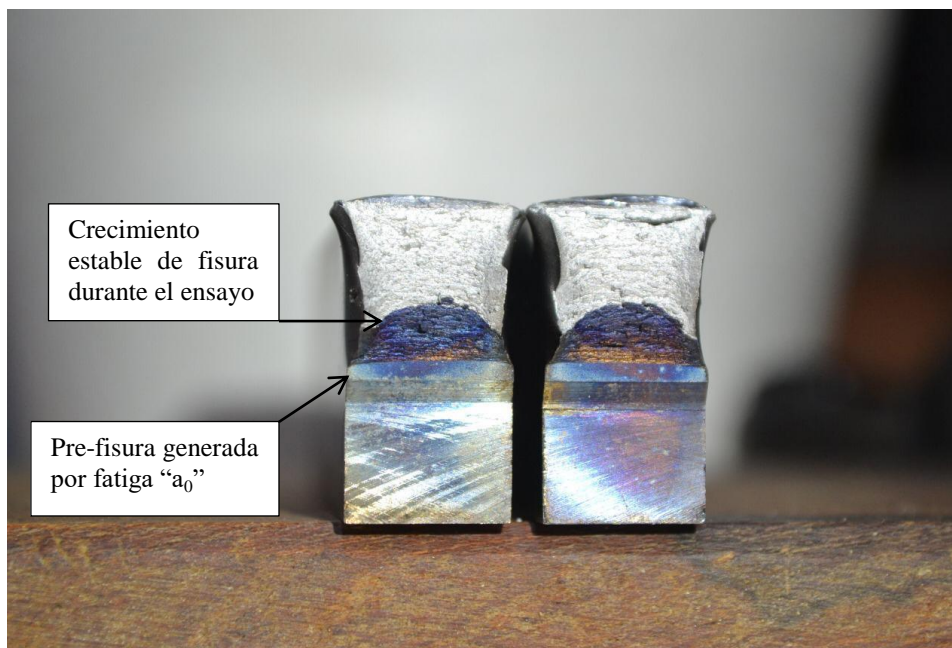


Figura 4.3: Teñido térmico sobre la superficie de fractura. Probeta 1.

Tabla 4.3: Longitudes inicial y final de fisura resultantes del teñido térmico.

	a_0 [mm]	a_f [mm]	b_0 [mm]
Probeta 1	12,17	15,62	12,13
Probeta 2	12,81	15,49	12,39
Probeta 3	12,57	14,53	10,47

4.1.6. Determinación de las propiedades mecánicas

Luego del teñido térmico se determinó la tensión de fluencia (σ_{YS}) y la tensión última (σ_{UT}) del material. Con estos valores se calculó la tensión de fluencia efectiva (σ_Y), la cual se requiere para obtener un valor de J a partir de las curvas de resistencia

El ensayo consiste en inducir un estado de tracción uniaxial a una probeta estandarizada aumentando progresivamente la deformación aplicada a velocidad de desplazamiento constante, hasta alcanzar la falla de la misma, mientras se registra automáticamente la información de carga y alargamiento de la longitud calibrada, que redonda en información de “Tensión vs Deformación”, para luego ser analizados. Los ensayos se realizaron bajo el procedimiento establecido en la norma ASTM E8 .

De cada mitad de probeta resultante de los ensayos de flexión se extrajo una probeta para el ensayo de tracción, dando esto como resultado dos ensayos por probeta. En la Tabla 4.4 se detallan las demisiones de las probetas, mientras que en la Figura 4.4 se muestra la probeta montada en la MUE.

Tabla 4.4: Dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción

		\varnothing_0 [mm]	L_0 [mm]
Probeta 1	Muestra 1	5,00	26,35
	Muestra 2	5,02	25,97
Probeta 2	Muestra 1	5,02	23,97
	Muestra 2	5,12	23,52
Probeta 3	Muestra 1	5,07	23,58
	Muestra 2	4,97	22,97

\varnothing_0 : Diámetro inicial de la caña, L_0 : Longitud inicial de la caña

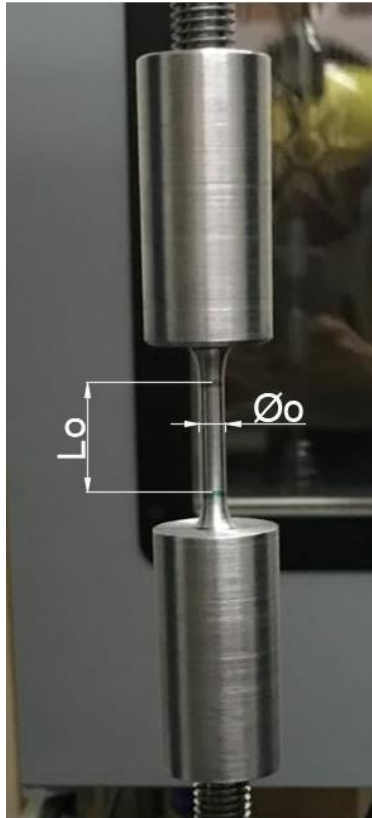


Figura 4.4: Probeta 1 montada en la máquina universal de ensayo.

Para determinar el valor de la tensión de fluencia se utilizó el método de desplazamiento de la recta de pendiente inicial a un 0,2% de deformación plástica, “*Offset Method*”.

En la Figura 4.5 se ilustra el método utilizado, en el cual el valor de m corresponde a un valor de deformación plástica definido por convención, que en el caso de los aceros y para determinar σ_Y es del 0,2%. Luego trazar la recta “ mn ” paralela a “ OA ”. La intersección del “ mn ” con el diagrama “Tensión vs Deformación” da como resultado la tensión de fluencia y se denota como σ_{YSm} . En la Tabla 4.5 se presentan los valores obtenidos. En la Tabla 4.6 se presenta el valor de tensión de fluencia efectiva para cada probeta, el cual se calculó con los valores promedio de la tensión de fluencia y la tensión última.

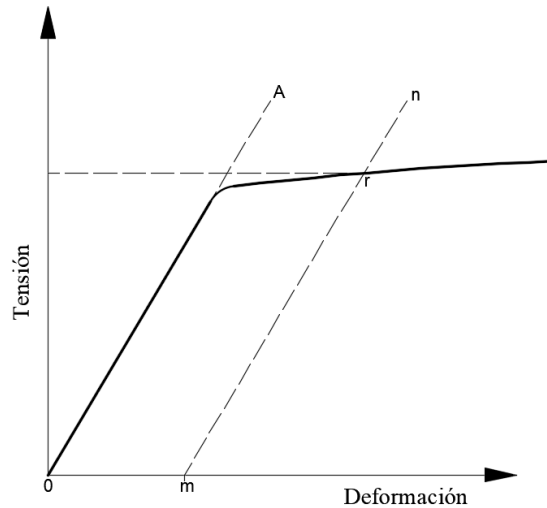


Figura 4.5: Método de compensación para determinar la tensión de fluencia.

Tabla 4.5: Valores de la tensión de fluencia y tensión última para cada probeta.

		$\sigma_{YS\ 0,2}$ [MPa]	σ_{UT} [MPa]
Probeta 1	Ensayo 1	431	560
	Ensayo 2	433	566
Probeta 2	Ensayo 1	629	706
	Ensayo 2	606	691
Probeta 3	Ensayo 1	645	710
	Ensayo 2	659	788

Tabla 4.6: Tensión de fluencia, última y efectiva resultantes para cada probeta.

	$\sigma_{YS\ 0,2}$ [MPa]	σ_{UT} [MPa]	σ_Y [MPa]
Probeta 1	432	563	497,5
Probeta 2	617,5	698,5	658
Probeta 3	652	749	700,5

4.1.7. Caracterización de la microestructura

Teniendo en cuenta que las muestras, según la información adjunta a las mismas, habían sido sometidas a deformación en diferentes sentidos respecto de la orientación de la fisura, y que las características de comportamiento plástico determinadas a partir de los ensayos de tracción mostraron diferencias sustanciales, se realizaron metalografías, a fin de analizar las diferencias microestructurales y sus características en relación a la posición y sentido de la fisura.

De la Probeta 1 y 2 se tomó una muestra y se identificaron dos caras, interna y externa, sobre las cuales se realizó el análisis metalográfico, Figura 4.6. La cara “interna” corresponde a la mitad de la altura de la probeta, es decir, aproximadamente la posición de la punta de la fisura. En la Figura 4.7 se muestran las metalografías de cada probeta. Sobre ambas probetas se pueden observar regiones perlíticas alargadas, esto muestra el sentido de laminación original, típicamente en caliente, de la chapa de la cual fueron extraídas las probetas. Las imágenes a y b de la Figura 4.7, características de la Probeta 1, no muestran textura significativa de los granos de ferrita, mientras que en la Probeta 2, imágenes c y d de la Figura 4.7, presentan un mayor grado de textura en los granos ferríticos. Esta diferencia en la microestructura podría explicar las diferencias en el comportamiento plástico que presentaron ambas muestras. En base a la información proporcionada por las metalografías se determinó que la fisura, en ambas muestras, se encontraba paralela a la dirección del laminado de la chapa. Ver Figura 4.8.

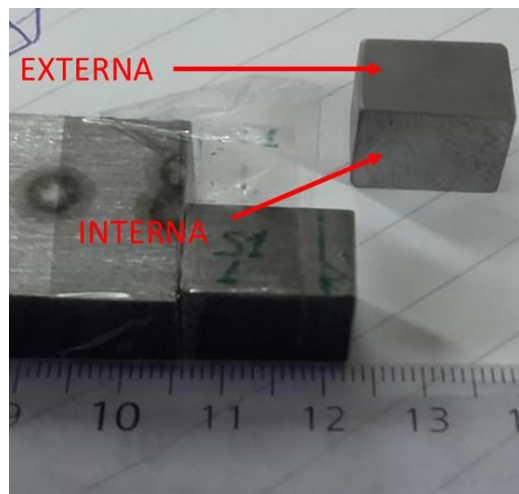


Figura 4.6: Caras de la muestra sobre las cuales se realizaron las metalografías

Según los datos originales, ambas probetas recibieron aproximadamente un 10% de reducción de altura por deformación en frío mediante un martinete, aunque en diferente sentido según la orientación de la fisura. El análisis microestructural, muestra la textura perlítica original, similar en ambas muestras, y que los granos de ferrita solo presentan signos de deformación plástica en la muestra de la Probeta 2. En las muestras de la probeta 1 los granos de ferrita se presentan equiaxiados, sin signos de deformación plástica. Esto, puede deberse a que el proceso con martinete

genera deformaciones localizadas y menos homogéneas que si se hubiese obtenido por laminado.

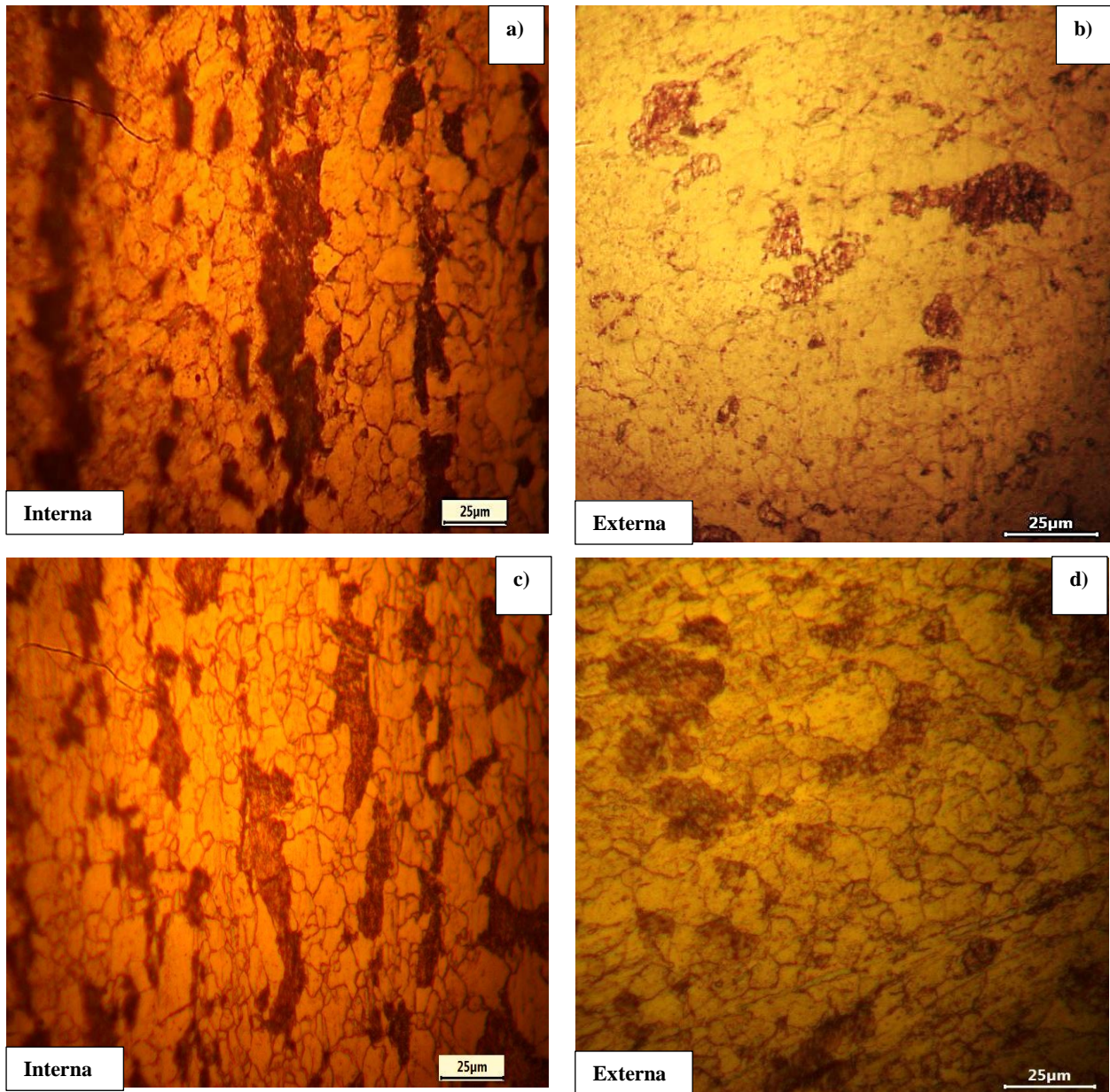


Figura 4.7: Metalografías de las cara interna y externa sobre la muestra extraída de cada probeta, a y b): Probeta 1, c y d): Probeta 2

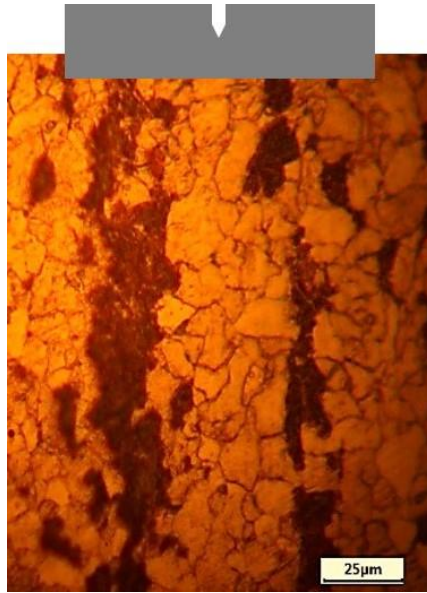
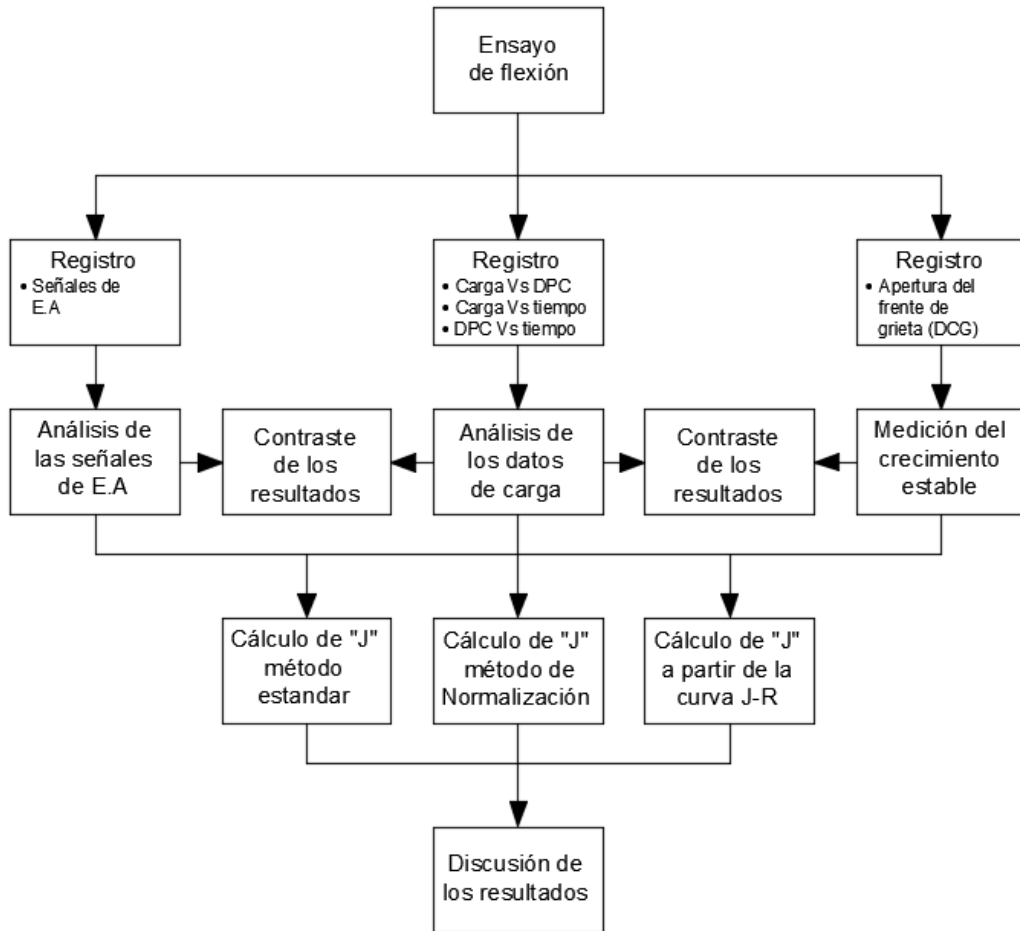


Figura 4.8: Orientación de la fisura respecto al sentido de laminación de la chapa

4.2. Resultados

4.2.1. Introducción.

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos del análisis de los datos registrados durante los ensayos de flexión, para cada probeta. Como se explicó, durante cada ensayo se registró la carga, el desplazamiento del punto de aplicación de la carga, el crecimiento de fisura en forma indirecta mediante el método del doble clip gauge (DCG), y las señales de EA. En una primera instancia se analizaron los datos de carga, EA y DCG por separado, en ese análisis se vieron aspectos generales como diagramas “Carga vs Desplazamiento”, amplitud y energía de las señales de E.A y obtención de las curvas crecimiento mediante el DCG. Luego se contrastaron estos resultados y se obtuvo información sobre los niveles de E.A a diferentes niveles de cargas, como así también se comparó el instante en el que el método del DCG predice el inicio de crecimiento estable con el determinado por la E.A. Luego se realizaron los cálculos de la integral J mediante tres métodos diferentes usando la información dada por la E.A, el DCG y el método de Normalización y se compararon los resultados. En la Figura 4.9 se presenta un diagrama de flujo que muestra cómo fueron analizados los datos. En lo que sigue se presentarán los resultados obtenidos en cada etapa del análisis.



DPC : Desplazamiento del punto de aplicación de la carga

Figura 4.9: Diagrama de flujo que explica cómo fueron analizados los datos

4.2.2. Análisis de las señales de E.A

Los parámetros de emisión acústica, explicados en la sección 3.2, utilizados para estudiar las señales transitorias emitidas por la fisura al propagarse son: la amplitud, la energía y la energía acumulada. Para cada ensayo se registró de forma continua y sincronizada la actividad acústica y la aplicación de la carga. A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de cada parámetro, de manera individual, para cada probeta. Luego se contrastan los resultados obtenidos con el registro de carga.

4.2.2.1. Amplitud de las señales de E.A

Para cada probeta ensayada se registró un evento de una amplitud considerablemente mayor a los restantes, este evento se denominó “Evento Característico” (EvC). En la Figura 4.10 se muestran los eventos registrados durante el ensayo para cada probeta,

donde se marca el evento característico. Mientras que en la Tabla 4.7 se presentan los valores de amplitud para el EvC de cada prueba. La importancia de estudiar el EvC radica en que este evento podría ser generado por el comienzo del crecimiento estable de fisura.

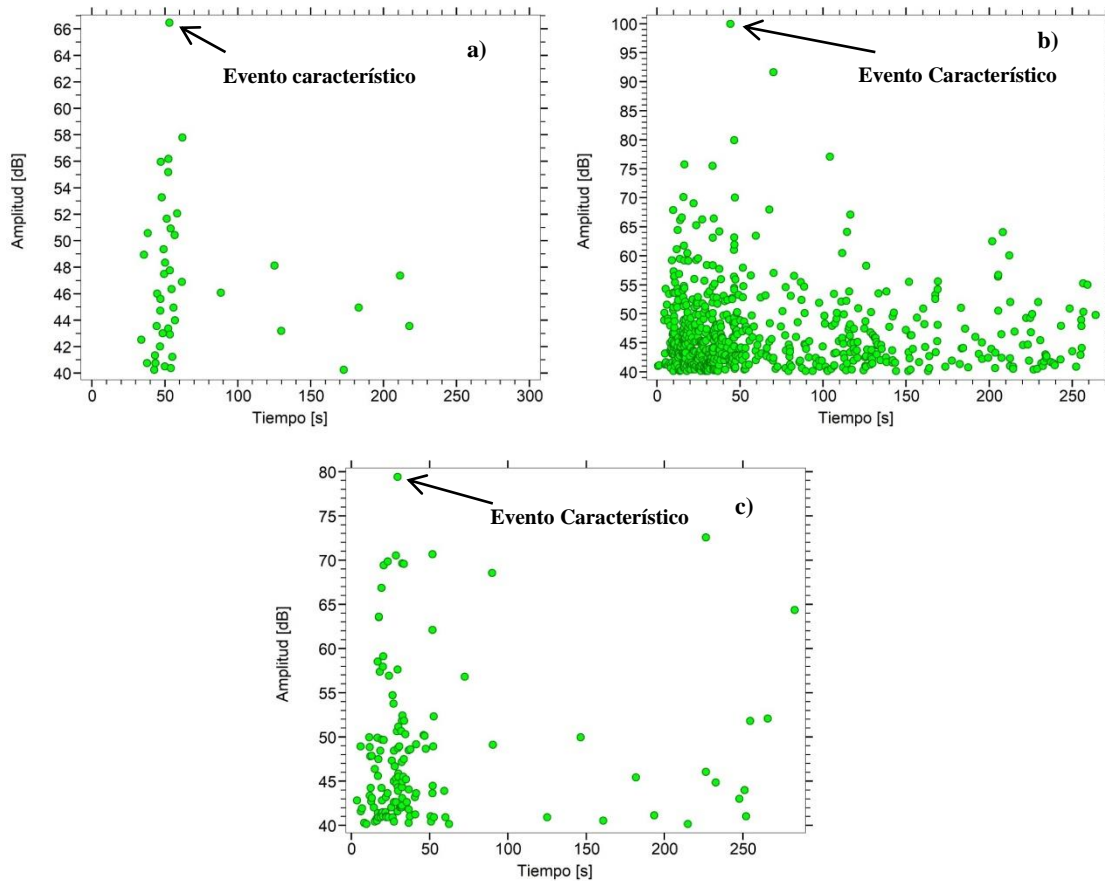


Figura 4.10: Amplitud de las señales de E.A registradas durante los ensayos. a) Probeta 1, b) Probeta 2; c) Probeta 3. Imagen extraída del Software Vallen.

Tabla 4.7: Amplitud del evento característico registrado durante cada ensayo.

	Amplitud EvC [dB]
Probeta 1	66,4
Probeta 2	100
Probeta 3	80

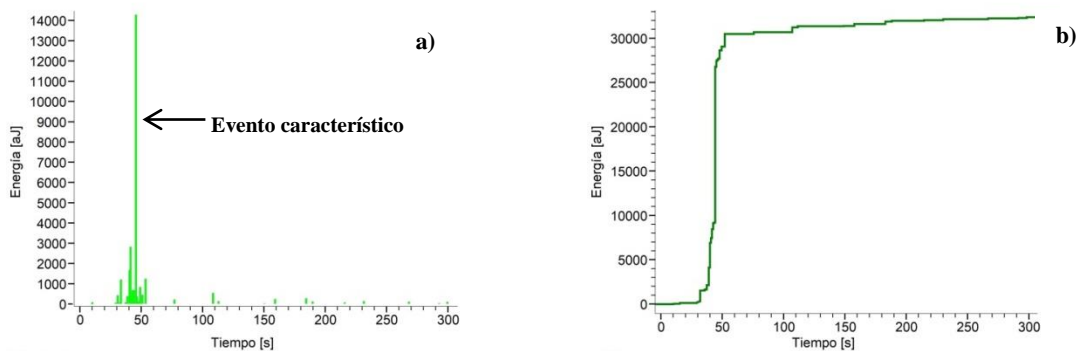
4.2.2.2. Energía y Energía acumulada

Como se explicó, cada evento de emisión acústica tiene una energía asociada la cual es función de la amplitud y duración de la señal. Para este caso el estudio se focalizó en la energía del evento característico, en tanto que se utilizó la energía acumulada para analizar la evolución de la liberación de energía a lo largo del proceso de propagación

de la fisura. En Figura 4.11 se muestran los niveles de energía y energía acumulada correspondientes a los eventos registrados durante los ensayos.

Como se puede observar los valores de energía de los eventos característicos de cada probeta no resultaron comparables entre sí. Esto, en principio se debe a que la energía depende de la amplitud y duración de la señal, y para cada ensayo las señales presentaron características diferentes en cuanto a estos dos parámetros. No obstante este análisis nos proporciona una herramienta más para poder identificar el momento en el que se da el evento característico ya que para una probeta dada el EvC presenta una energía mucho mayor a la del resto de los eventos.

Otro aspecto que se rescata de este análisis es que previo al EvC se registró actividad acústica, estas señales pueden ser generadas por el movimiento de dislocaciones producido por el proceso de deformación plástica que se da en la punta de fisura previo al inicio del crecimiento estable (Molina G. A. & Gonzalez M. E., 2015).



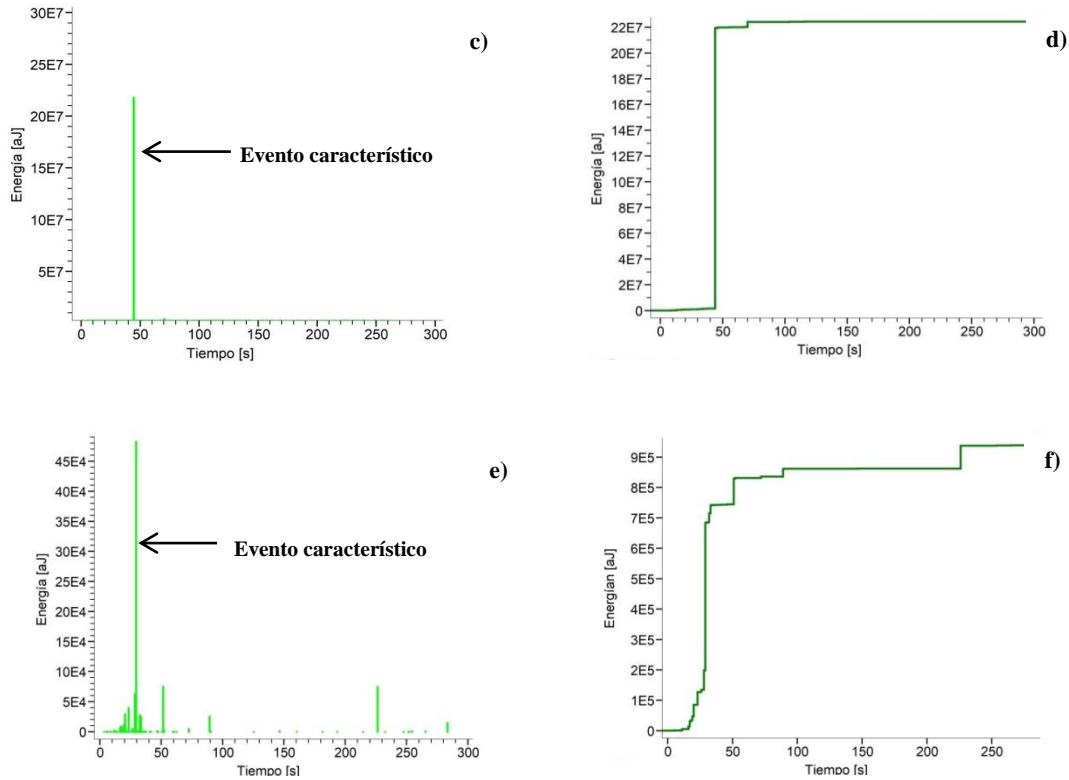
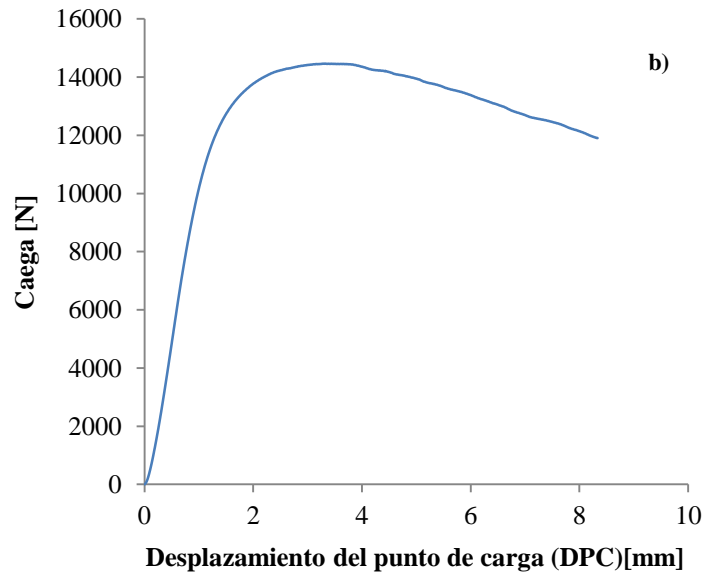
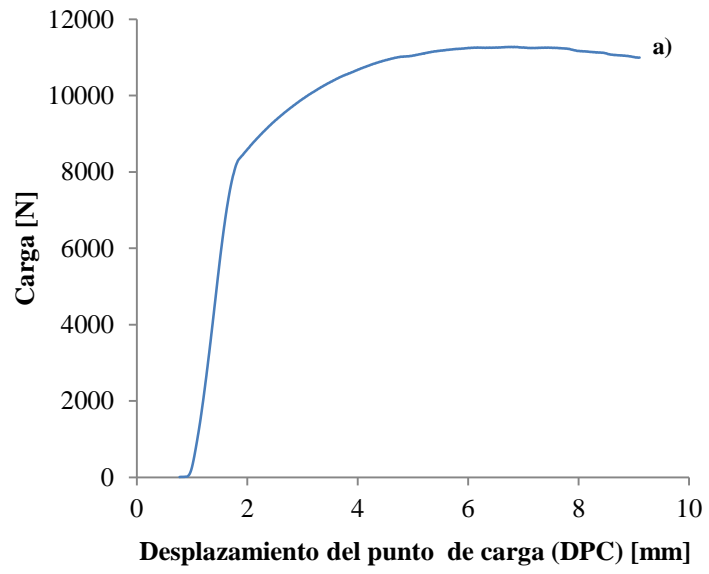


Figura 4.11: Energía y energía acumulada de las señales registradas durante la prueba de flexión. a) y b) Probeta 1, c) y d) Probeta 2, e) y f) Probeta 3. Imagen del software Vallén.

4.2.3. Resultados de carga – desplazamiento - tiempo.

El ensayo de una probeta prefisurada mostrará un registro “Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga (DPC)” no lineal, debido a la plasticidad, y al crecimiento estable de fisura, el área bajo el registro puede ser evaluado por el parámetro elastoplástico J, parámetro que se desea estudiar. Esto pone en evidencia la necesidad del registro “Carga vs Desplazamiento”, para el cálculo de J. En la Figura 4.12 se presentan los registros “Carga vs Desplazamiento”, mientras que en la Figura 4.13 se muestran los registros “Carga vs Tiempo” para cada probeta ensayada. En la Tabla 4.8 se resume el valor de carga máxima alcanzado por cada probeta.



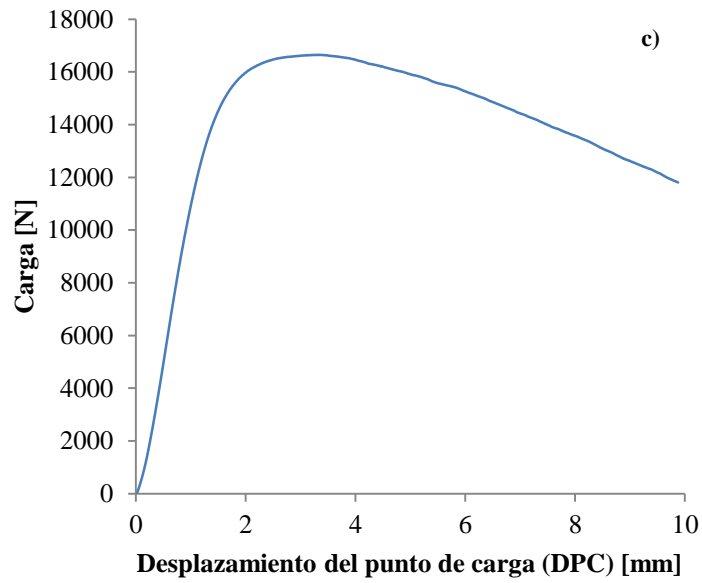
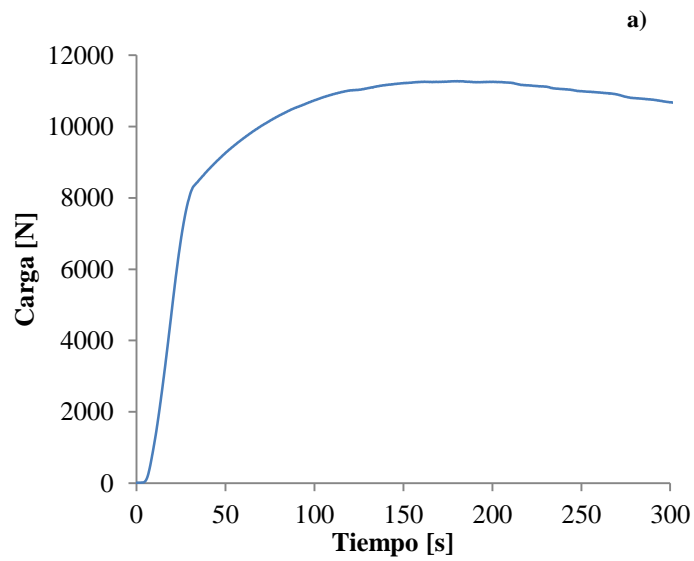


Figura 4.12: Diagrama Carga vs DPC de cada probeta ensayada. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.

Tabla 4.8: Carga máxima alcanzada por cada probeta.

	Carga máxima [N]
Probeta 1	11276
Probeta 2	14464
Probeta 3	16649



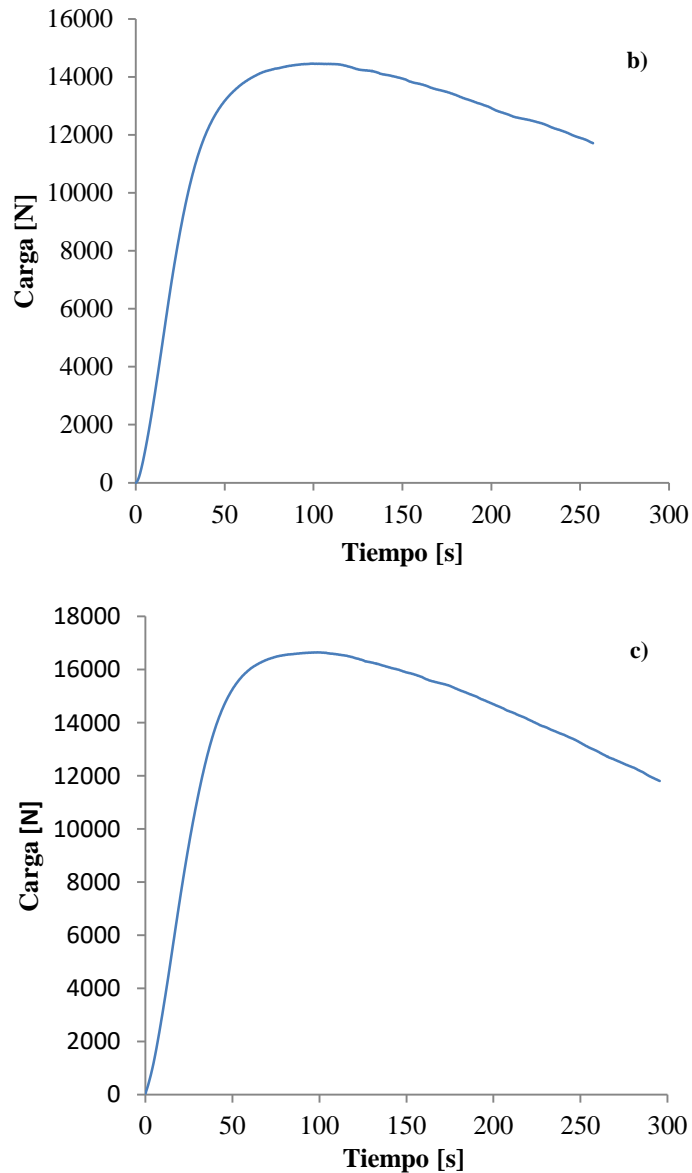
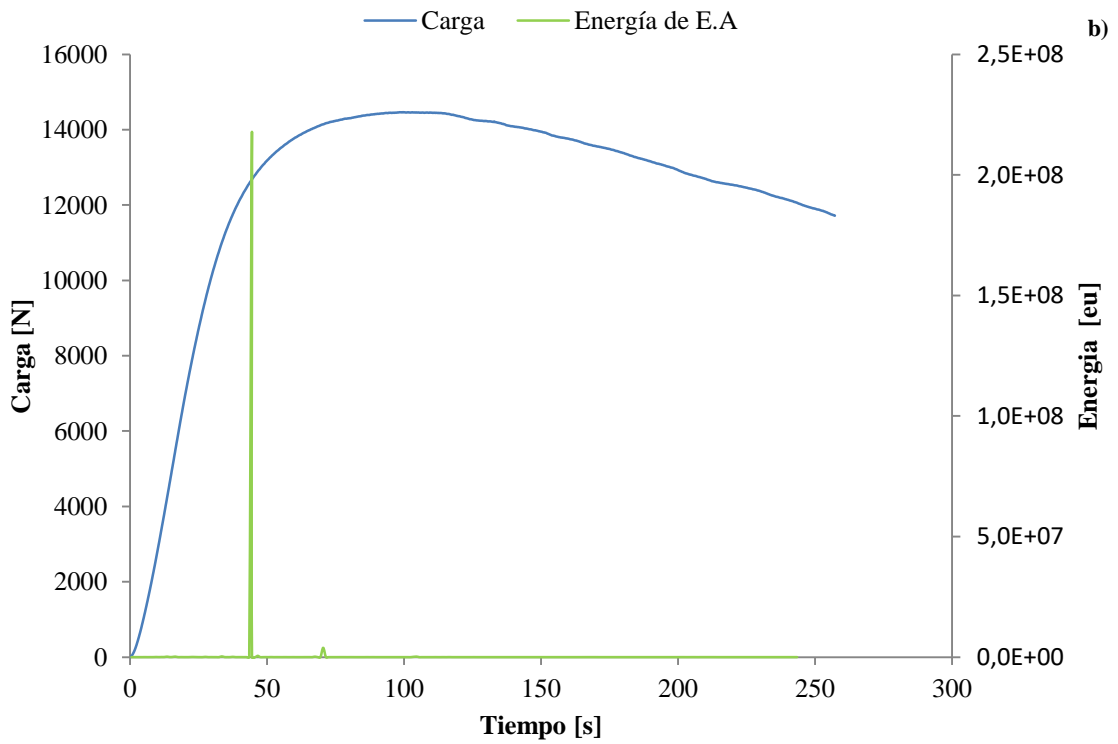
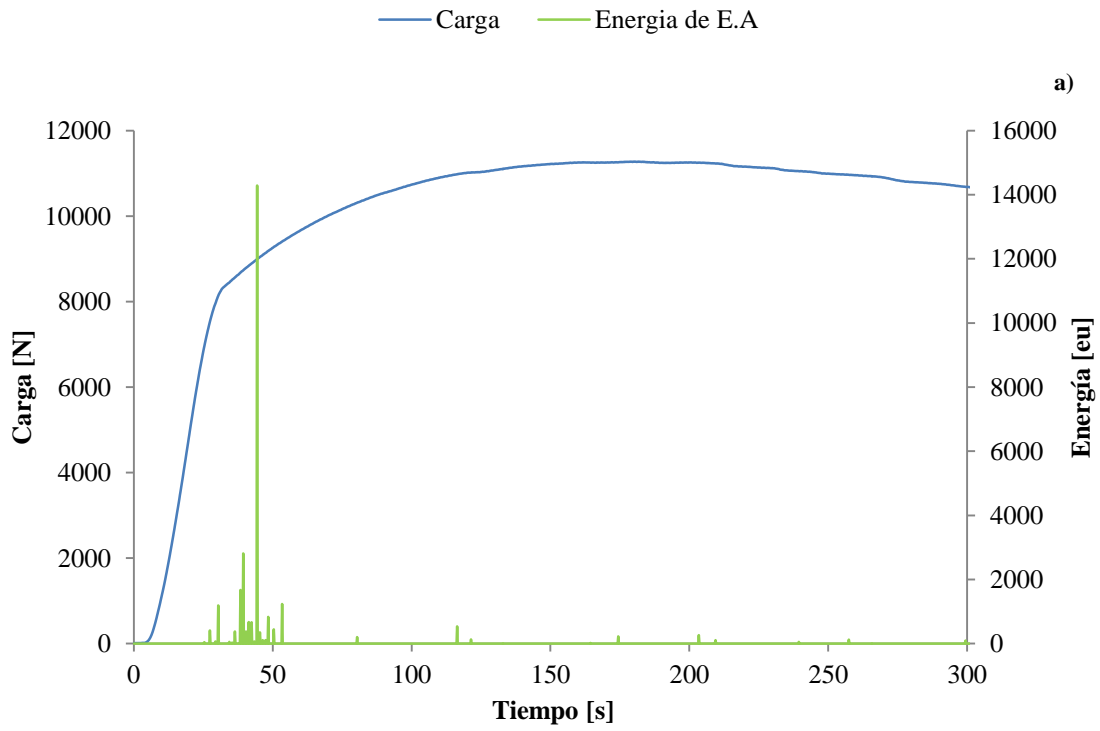


Figura 4.13: Diagrama Carga vs Tiempo. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3

4.2.4. Relación entre la carga y la E.A

La prueba de flexión y la medición de EA se realizó en simultáneo, por lo que ambos ensayos tienen la misma base de tiempo, esto permite contrastar las gráficas de “Carga vs Tiempo” y “Energía vs Tiempo”. Un aspecto importante que se rescata de esto es poder determinar la carga para la cual se da el evento característico, valor de carga requerido para el cálculo de J según las expresiones presentadas en la sección 3.3. En la Figura 4.14 se presentan los gráficos de carga y energía versus tiempo para cada una de las probetas.



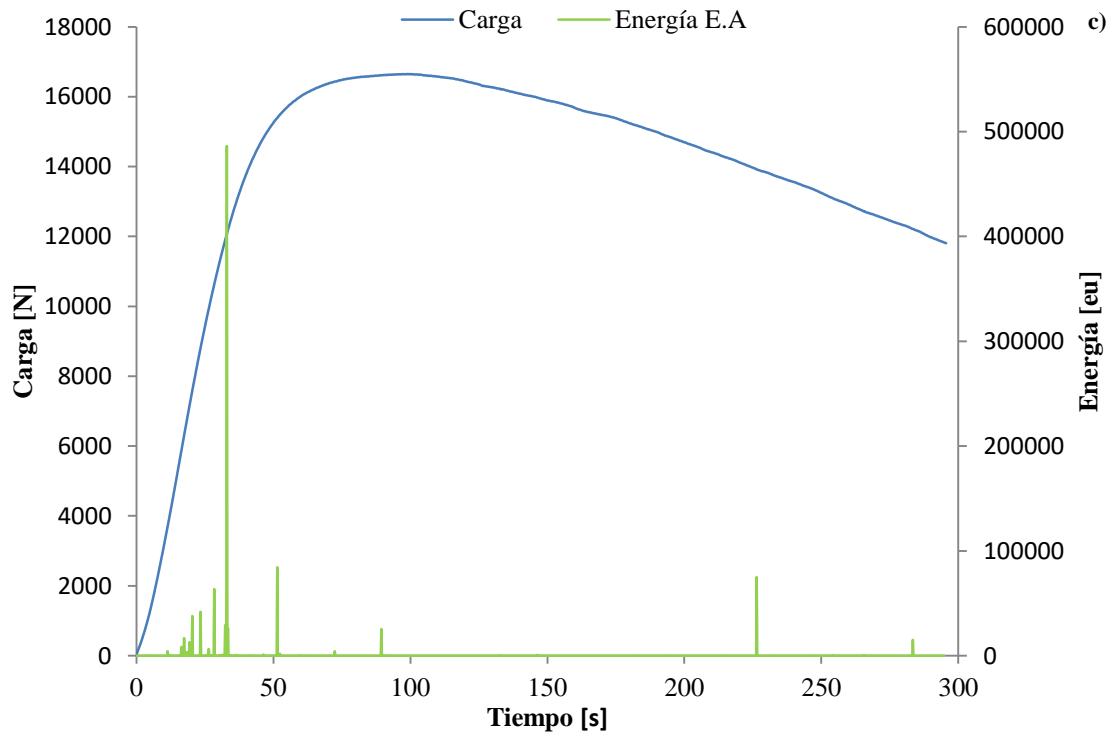


Figura 4.14: Correlación de las señales de carga y energía versus tiempo. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.

Como ya se mencionó los valores de energía registrados en cada ensayo no son comparables entre sí, sin embargo hay una tendencia bien marcada donde se puede observar que el evento característico se da instantes antes de alcanzar la carga máxima, zona donde se registra el comienzo de crecimiento estable. La diferencia en los valores de energía registrados podría deberse a factores propios del material como puede ser la atenuación propia del mismo o factores externos propios del montaje de los sensores. En la Tabla 4.9 se presentan los valores de carga para los cuales ocurre el evento característico.

Tabla 4.9: Valor de carga alcanzado en el tiempo del EvC.

	Carga [N]	Tiempo [s]
Probeta 1	8974	43
Probeta 2	12674	45
Probeta 3	12181	33

4.2.5. Medición del crecimiento estable mediante DCG.

Como se explicó, el método del Doble Clip Gauge (DCG) permite determinar en forma indirecta el crecimiento estable de fisura, midiendo la apertura de la boca de fisura a dos distancias diferentes del centro aparente de rotación. En la Figura 4.15 se muestra un registro típico del método, donde se pueden distinguir dos zonas. En la zona I vemos una gran dispersión de los datos, estos datos no tiene significado físico, lo que sucede es que inicialmente la probeta esta recta y matemáticamente su centro de rotación se encuentra en el infinito. En la zona II a medida que la probeta se flexiona, el centro de rotación queda bien definido y se comienza a tener un registro real de la longitud de fisura.

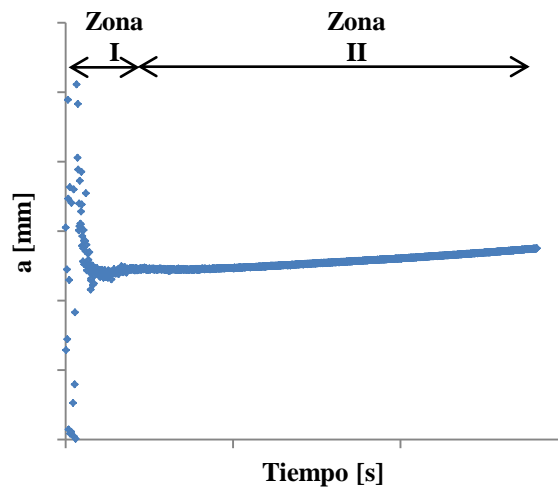
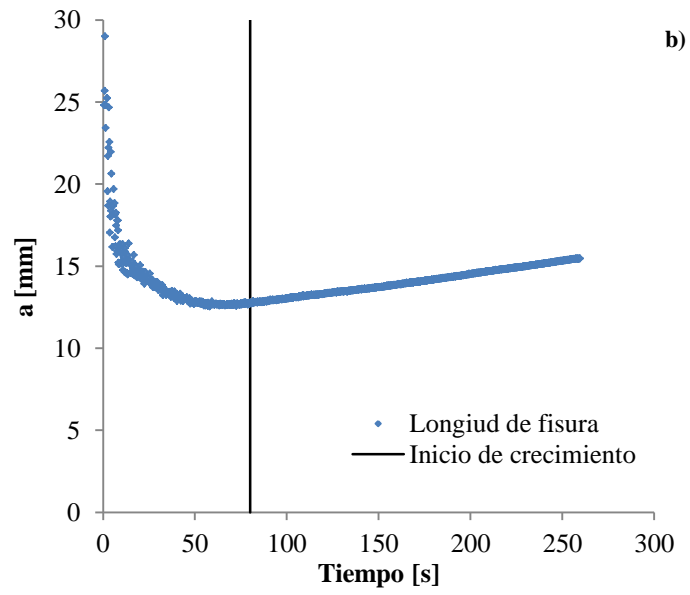
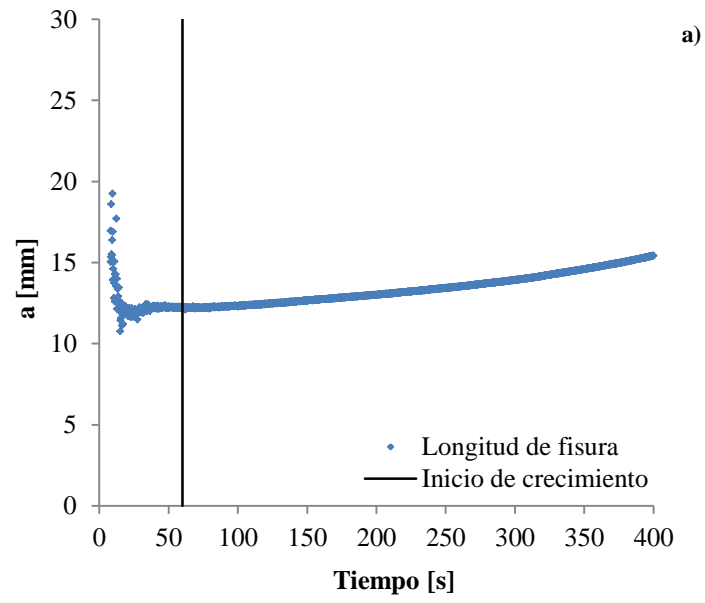


Figura 4.15: Registro típico del crecimiento de fisura mediante el métodos del DCG.

Mediante el método del DCG y conociendo el valor de a_0 , medido mediante el teñido térmico, se puede determinar aproximadamente el momento de inicio del crecimiento estable. En la Figura 4.16 se muestra el registro del método para cada una de las probetas. En la Tabla 4.10 se presentan los tiempos que arrojó el DCG para el comienzo de crecimiento estable y el Δa medido.



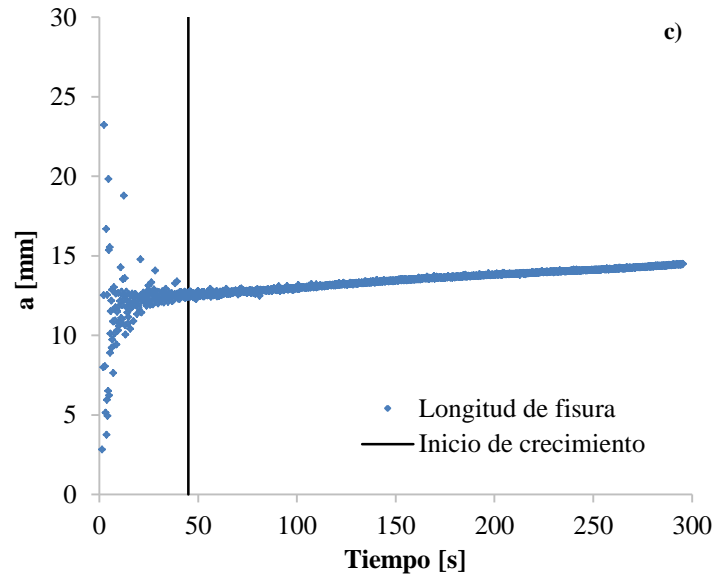


Figura 4.16: Inicio de crecimiento estable según el registro del DCG.

Tabla 4.10: Inicio de crecimiento predicho por el DCG.

	Inicio de crecimiento [s]	Δa [mm]
Probeta 1	60	3,47
Probeta 2	80	2,65
Probeta 3	45	1,9

4.2.6. Relación entre el DCG y la E.A

Dado que para el registro de datos de ensayo se utilizó una base de tiempo única, fue posible comparar el tiempo del inicio de crecimiento estable determinado por DCG, con el tiempo en el cual se dio el evento característico. En la Tabla 4.11 se comparan estos resultados. Como se puede observar hay diferencias de hasta 35 segundos entre ambos métodos, en principio esto puede asociarse a la gran dispersión que presenta el método del doble clip en la zona del comienzo de crecimiento, razón por la cual este dato así obtenido es solo aproximado, de hecho el método no se utiliza para definir el comienzo de crecimiento estable de esta manera, sino para determinar los valores de crecimiento estable que permitan generar la curva de resistencia.

Tabla 4.11: Tiempo para el cual se registra el inicio de crecimiento según el método del DCG y la E.A

	Inicio de crecimiento [s]	
	DCG	Emisión Acústica
Probeta 1	60	43
Probeta 2	80	45
Probeta 3	45	33

4.2.7. Cálculo de la integral J

4.2.7.1. Cálculo de J para el evento característico

Habiéndose determinado la carga para la cual se da el EvC de emisión acústica es posible determinar un valor único de J para un punto del registro “Carga vs Desplazamiento” ($P_i; v_i$) mediante el método explicado en la sección 3.1. Donde:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3.23)$$

$$J_{el} = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (3.24)$$

$$K = \left[\frac{P_i S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \right] \cdot f \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (3.25)$$

$$J_{pl} = \frac{\eta_{pl} A_{pl}}{B_N b_0} \quad (3.27)$$

En la Tabla 4.12 se presentan los valores de J obtenidos para el EvC de cada probeta. Estos valores serán comparados con los que se obtuvieron mediante la construcción de la curva J-R usando el método del DCG y el método de Normalización.

Tabla 4.12: Valores de J determinados para la carga en la que ocurre el evento característico.

	Carga del EvC [N]	a_0 [mm]	J [KJ/m ²]
Probeta 1	9035,07	12,17	112,3
Probeta 2	12733,31	12,81	153,64
Probeta 3	12181,61	12,57	104,82

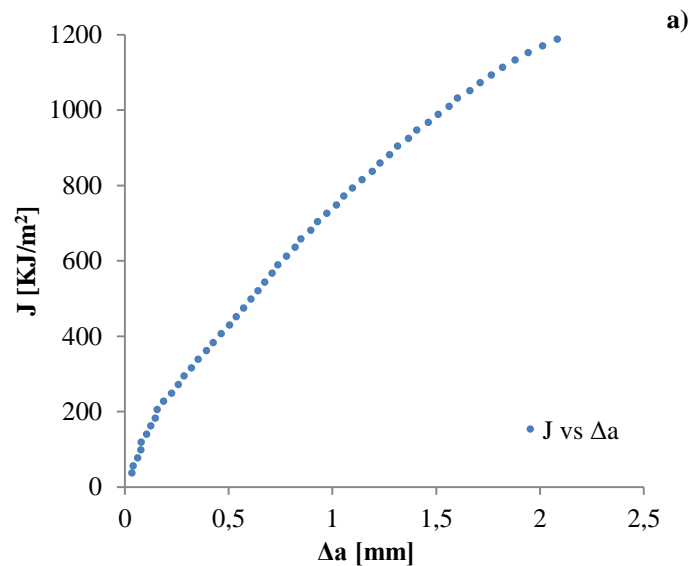
4.2.7.2. Cálculo de J a partir de la curva de resistencia *J-R*

Como ya fue explicado se puede calcular J a partir de la curva de resistencia *J-R*. Mediante los datos del DCG y el registro de “Carga vs Desplazamiento” es posible determinar J_i para cada punto $(P_i; v_i)$ mediante el método incremental explicado en la sección 3.3. Una vez calculado J_i se procede a construir la curva *J-R* y determinar J_Q .

A continuación, se detallan los pasos del procedimiento explicado en la sección 3.3 para la determinación de la curva de resistencia *J-R* a partir del método incremental, para cada probeta.

Grafica *J-Δa*

Una vez determinado J_i para cada Δa_i se procede a graficar la curva *J-Δa*. En la Figura 4.17 se presentan dichas curvas para cada probeta.



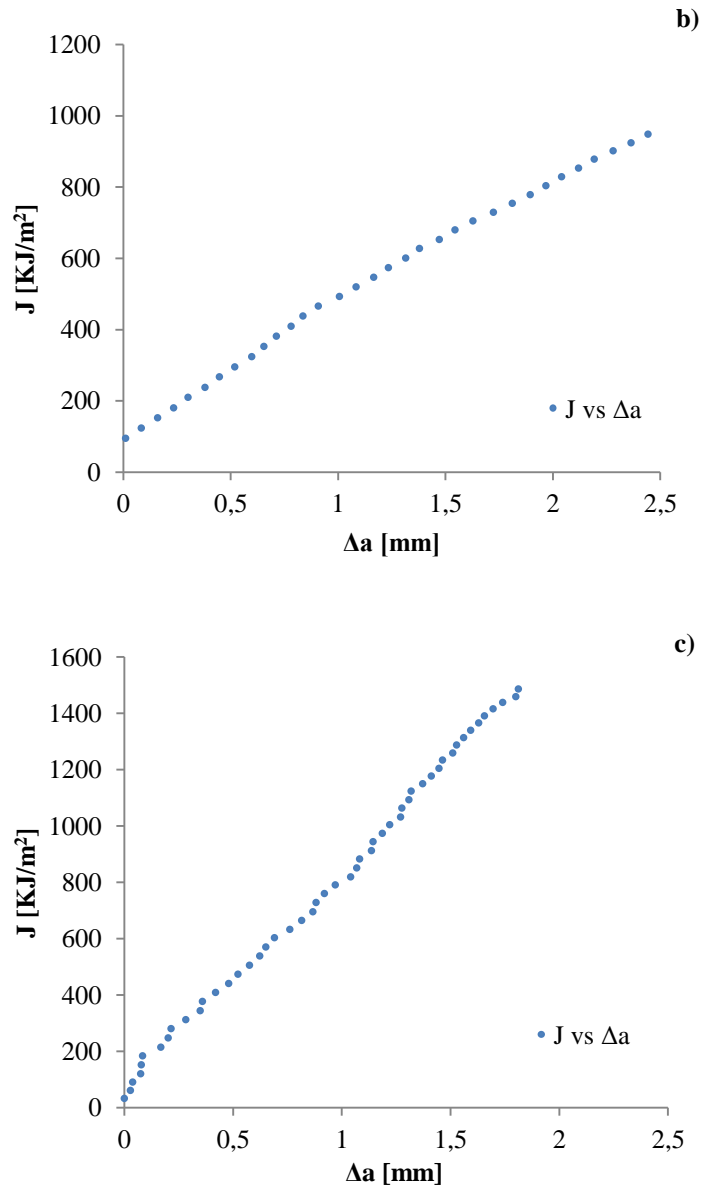


Figura 4.17: Grafica J vs Δa . a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3

Regresión lineal y construcción de la curva $J-R$.

Una vez determinada la curva $J-\Delta a$ se deben delimitar los datos que se utilizarán para realizar la regresión. Los datos utilizados para esto son delimitados por las líneas de exclusión 0,15 y 0,5 y la recta definida por J_{limite} como se explicó en la sección 3.3.

Las líneas de exclusión están determinadas por la línea de construcción la cual se define como:

$$J = 2\sigma_Y \Delta a \quad (3.39)$$

La pendiente de la línea de construcción “ $2\sigma_Y$ ” cumple un papel determinante en este proceso ya que no solo es un factor de peso para la selección de los datos, sino que

también lo es para la determinación de J. El valor de 2 que acompaña a la tensión de fluencia efectiva está definido por la norma ASTM E-1820, sin embargo trabajos como el de W. Mills establecen que para materiales dúctiles este valor puede ser hasta de 4 (Mills W., 1981). Este aspecto será tratado en más detalle, durante la discusión de los resultados. En la Tabla 4.13 se presentan los valores para la pendiente de la línea de construcción de cada probeta y sus respectivos valores de J_{limite} . En la Figura 4.18 se muestra el proceso de selección de datos aplicado a la probeta 2.

Tabla 4.13: Pendiente de la línea de construcción para cada probeta.

	$2\sigma_Y$ [MPa]	J_{limite} [KJ/m ²]
Probeta 1	995	804,6
Probeta 2	1315,5	1086,2
Probeta 3	1325	1097,8

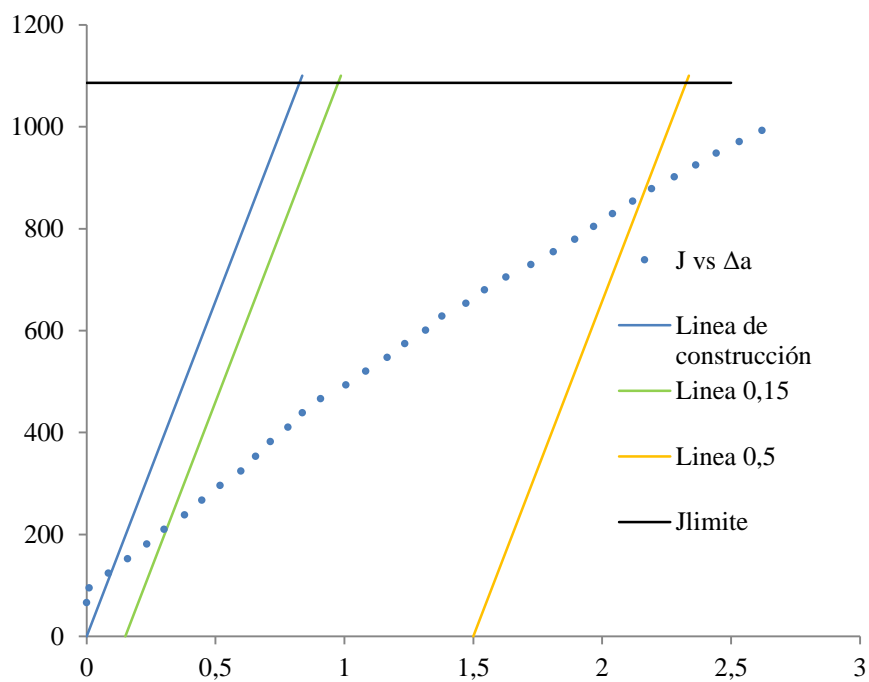


Figura 4.18: Selección de datos utilizados en la regresión lineal. Probeta 2

Una vez delimitados los valores se debe proceder a realizar la regresión. Utilizando el método de los mínimos cuadrados se debe construir una línea de regresión de la siguiente forma:

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln(\Delta a) \quad (3.40)$$

Y determinar el valor de las constantes C_1 y C_2 . En la Tabla 4.14 se presentan los valores de C_1 y C_2 para cada probeta.

Tabla 4.14: Valores de las constantes C_1 y C_2 resultantes para cada probeta.

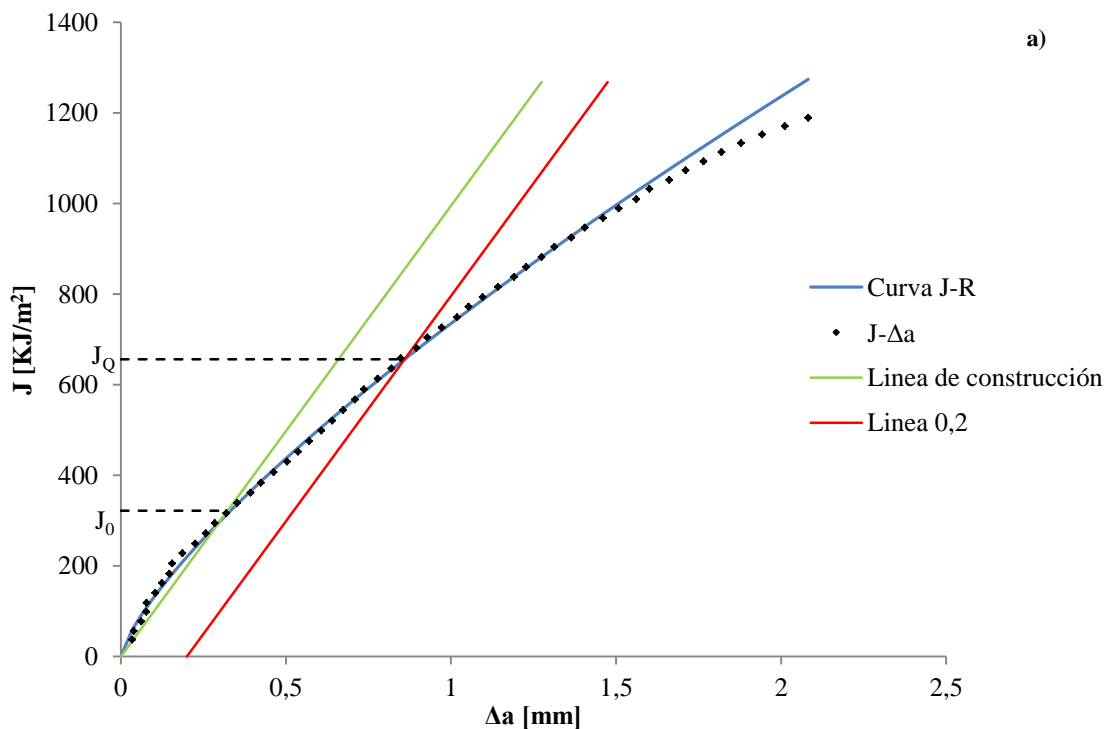
	C_1	C_2
Probeta 1	735,09	0,75
Probeta 2	492,74	0,74
Probeta 3	820,57	0,81

Habiéndose determinado el valor de las constantes C_1 y C_2 se procede a construir la curva J - R como:

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (3.41)$$

Determinación de J_0 , y J_Q

Una vez construida la curva de resistencia se pueden determinar los valores de J_0 y J_Q . El valor de J_0 queda definido por la intersección de la “*Blunting line*” con la curva original J - Δa , mientras que J_Q queda definido por la intersección de la Línea 0,2 y la curva J - R . En la Figura 4.19 se detalla este proceso para cada probeta. En la Tabla 4.15 se presentan los valores de J_0 , y J_Q para cada probeta.



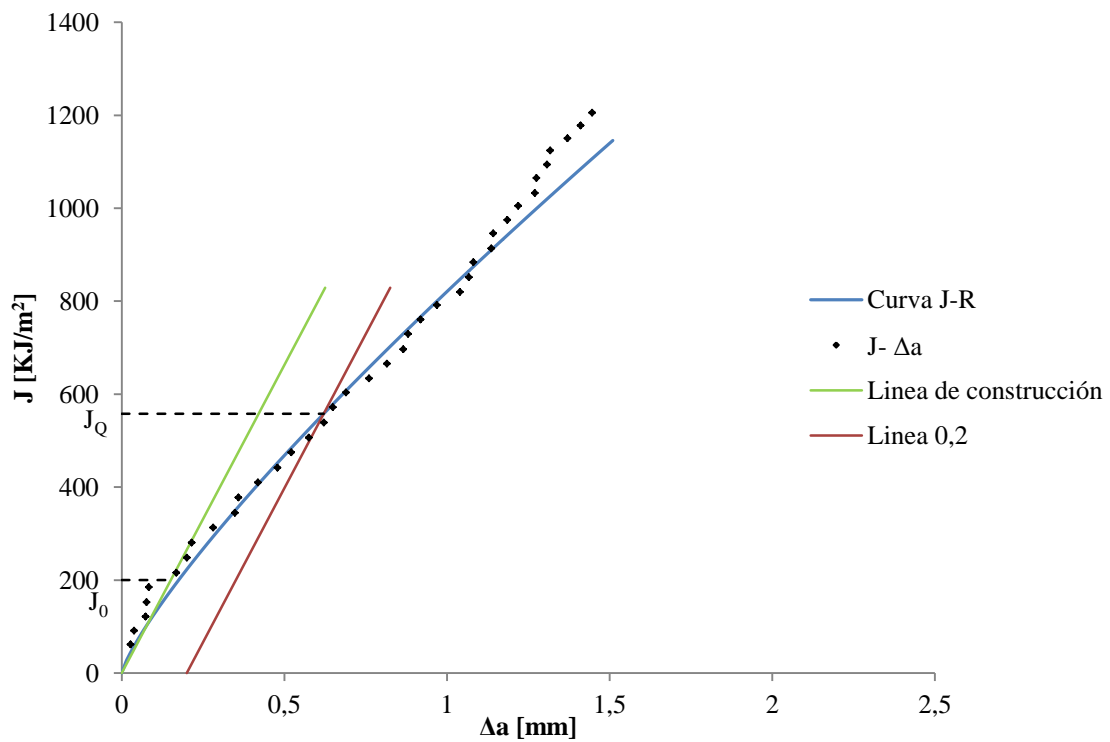
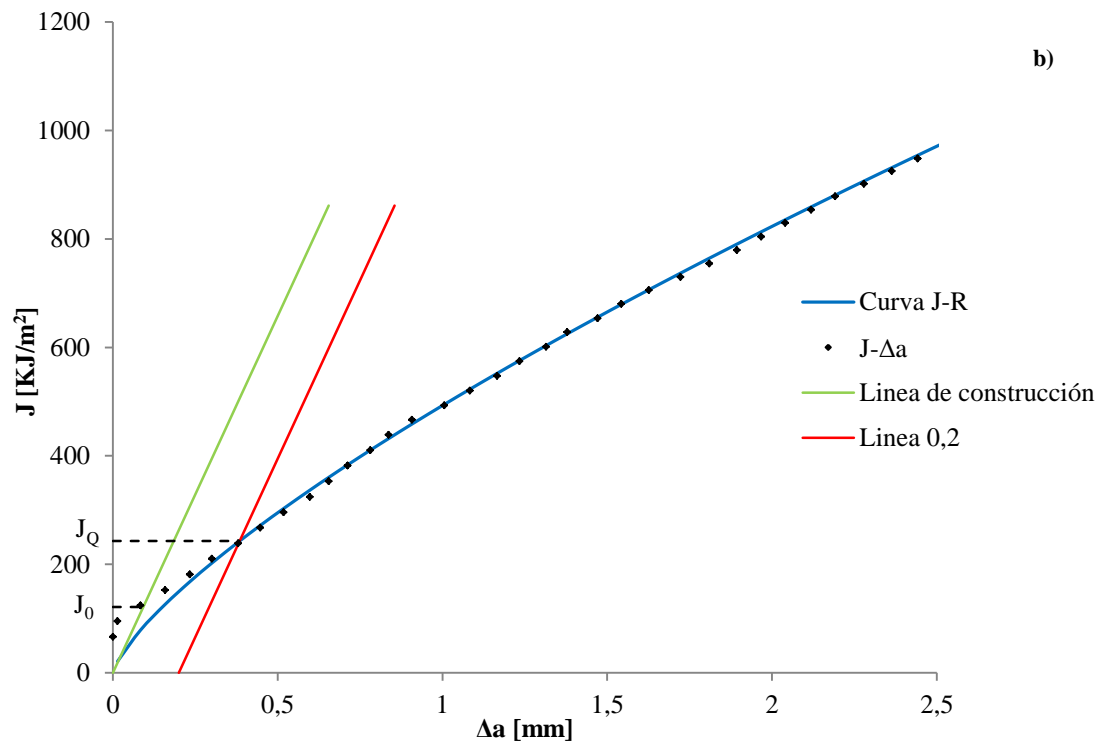


Figura 4.19: Valores de J_0 y J_Q determinados a partir de la curva J-R construida a partir del método de DCG. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.

Tabla 4.15: Valores de J_0 y J_Q para cada probeta.

	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]
Probeta 1	321,18	656,13
Probeta 2	121,28	242,97
Probeta 3	200,08	557,82

4.2.7.3. Cálculo de J por el método de Normalización

Mediante el método de Normalización se puede construir la curva $J-\Delta a$, y por ende la curva $J-R$ a partir del registro “Carga vs Desplazamiento” y las longitudes inicial y final de fisura. En el diagrama de la Figura 4.20 se presenta de manera resumida el procedimiento de aplicación del método. El mismo fue explicado con más detalles en la sección 3.3.

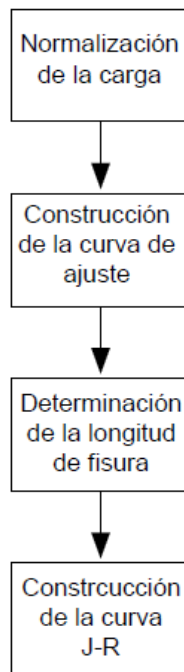


Figura 4.20: Procedimiento para la aplicación del método de Normalización.

Una vez realizado el paso de normalización de la carga y el desplazamiento con las Ecuaciones 3.46 y 3.48, ver sección 3.3, se procede a la construcción de la curva de ajuste.

$$P_{Ni} = \frac{P_i}{BW \left(\frac{W - a_{bi}}{W} \right)^{\eta_{pl}}} \quad (3.46)$$

$$V'_{pli} = \frac{V_{pl}}{W} = \frac{v_i - (C_i P_i)}{W} \quad (3.48)$$

Los puntos ($P_{Ni}; V'_{pli}$) se ajustan mediante la función de normalización, Ecuación (3.45), y se determinan los valores de las constantes de ajuste $a, b, c,$ y d

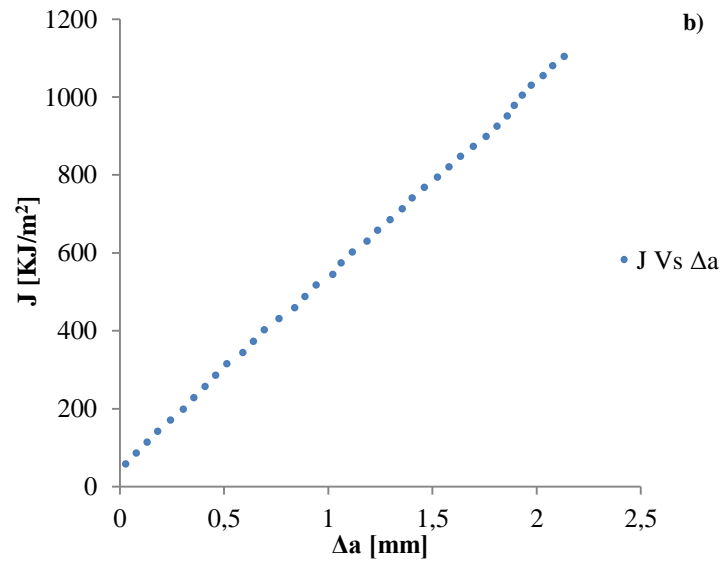
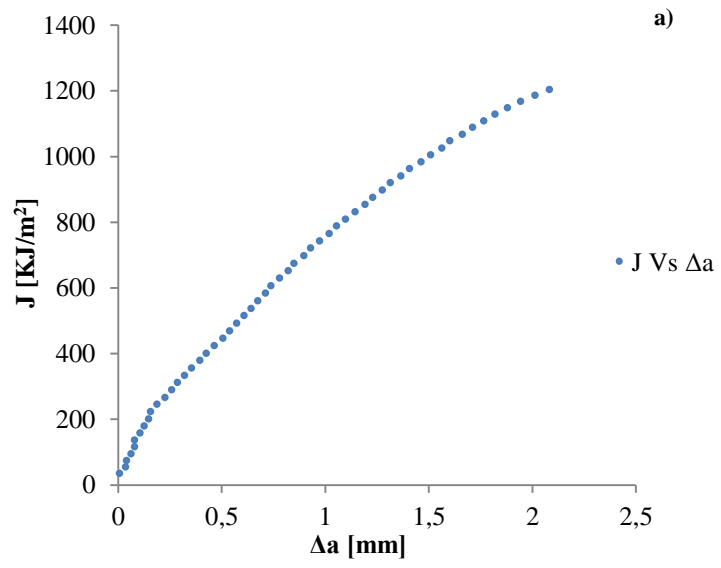
$$P_N = \frac{a + b * v'_{pl} + c * v'_{pl}^2}{d + v'_{pl}} \quad (3.45)$$

En la Tabla 4.16 se presentan los valores de las constantes de ajuste obtenidos para cada probeta.

Tabla 4.16: Valores de las constantes de ajuste.

	a	b	c	d
Probeta 1	-4,329	86,09	325,3	-0,03752
Probeta 2	-1,785	192,1	250,2	0,001863
Probeta 3	-2,286	236,7	11,49	-0,0001564

Habiendo quedado definidas las constantes de ajuste se debe determinar el valor de longitud de fisura (a), tal que $P_{Ni} = P_N$. Teniendo el valor de “ a ” se puede calcular el valor de la integral J , En la Figura 4.21 se presentan las curvas $J-\Delta a$ obtenida mediante el método de normalización para cada probeta. Una vez determinadas las curvas $J-\Delta a$, mediante el mismo procedimiento aplicado para las curvas obtenidas mediante el DCG, se procede a calcular las curvas de resistencia y determinar los valores de J_0 y J_Q para cada probeta. En la Figura 4.22 se muestran las curvas de resistencias y en la Tabla 4.17 se presentan los valores de J_0 y J_Q para las distintas probetas



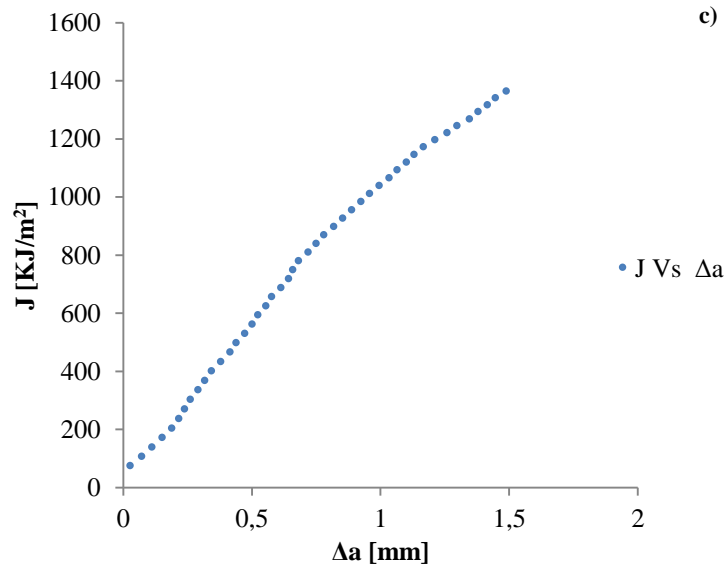
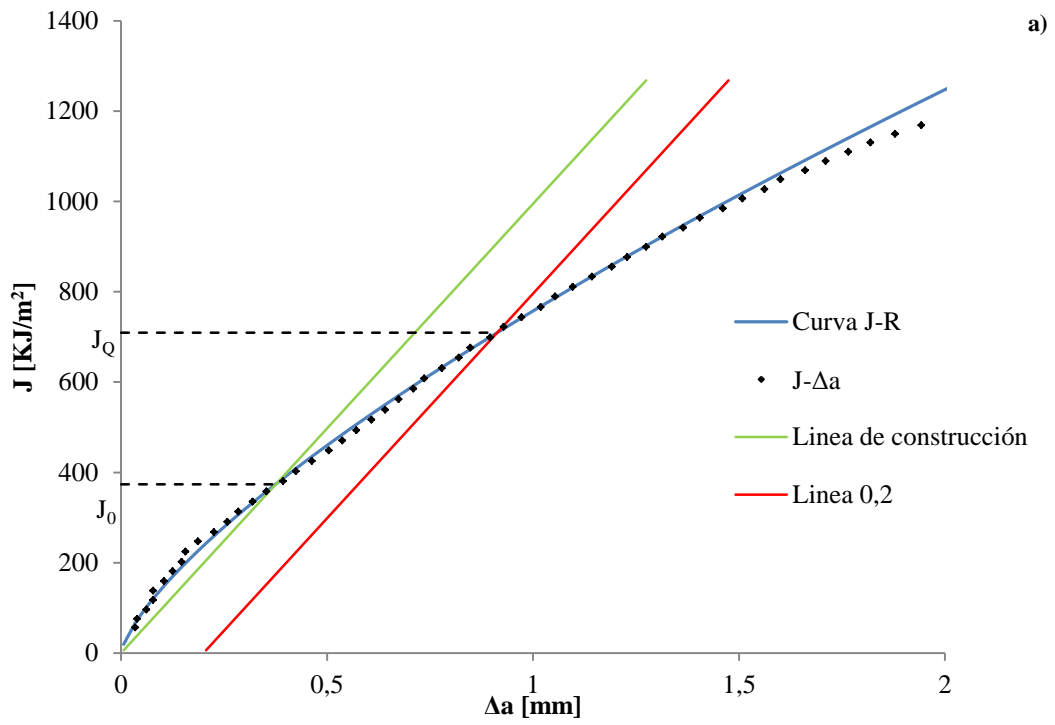


Figura 4.21: Curva J vs Δa obtenida mediante el método de normalización. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.



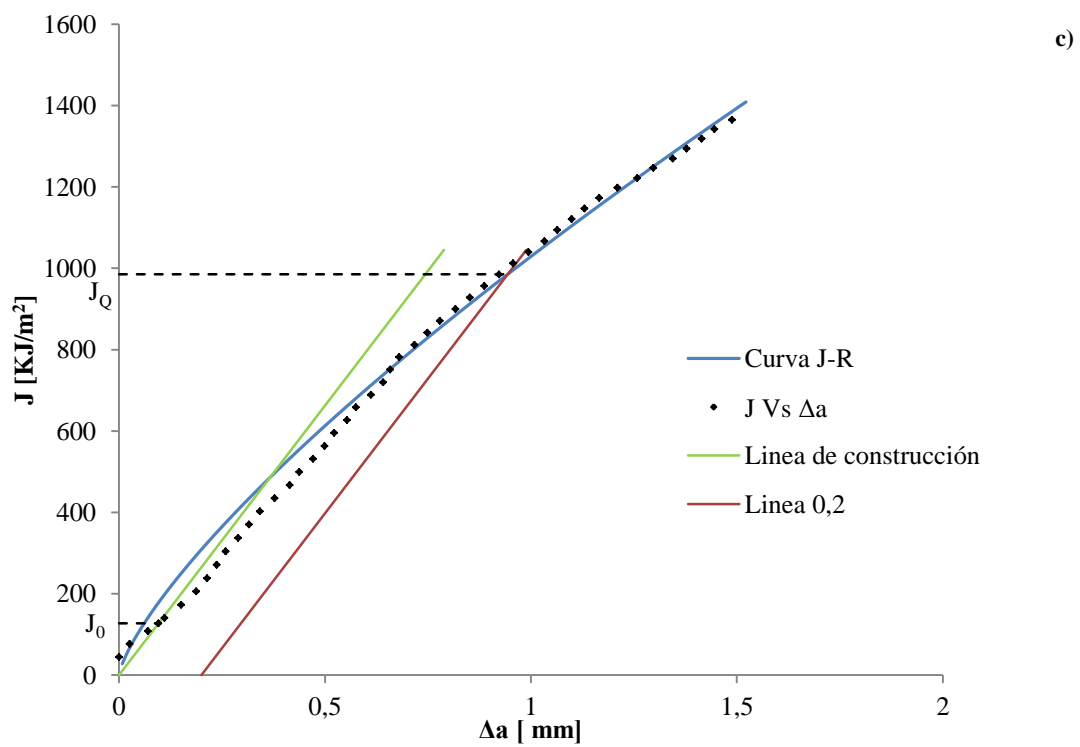
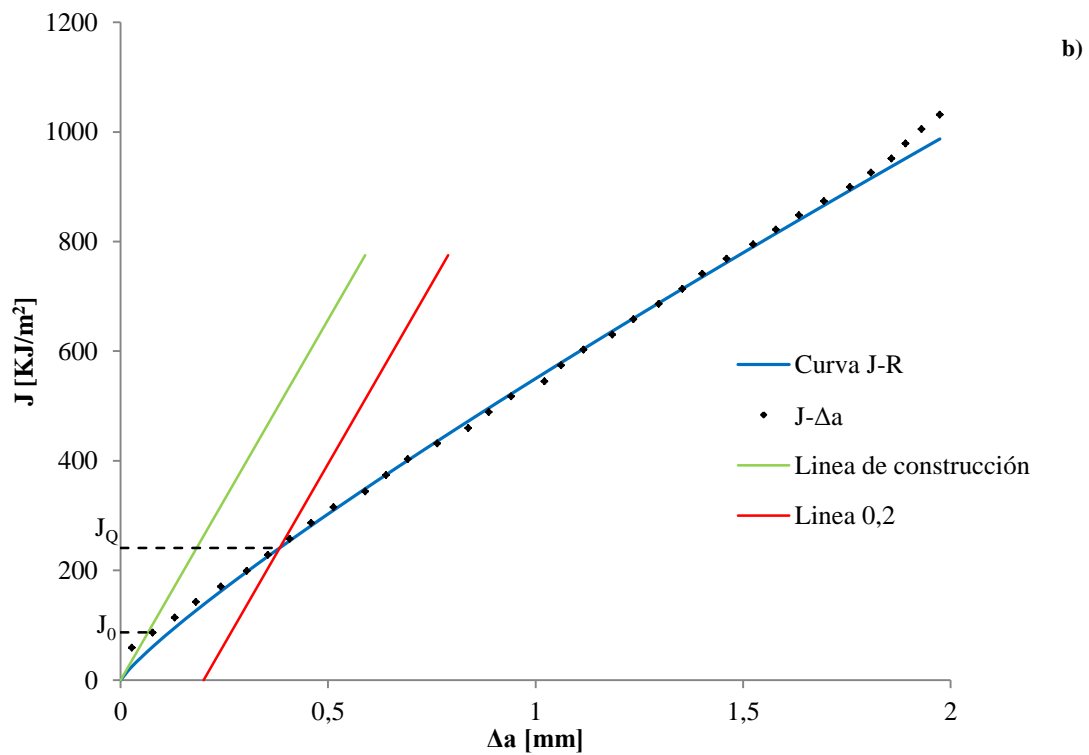


Figura 4.22: Valores de J_0 y J_Q determinados a partir de la curva J-R construida con el método de Normalización. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3

Tabla 4.17: Valores de J_0 y J_Q obtenidos a partir del método de Normalización.

	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]
Probeta 1	373,6	709,4
Probeta 2	87,8	241,7
Probeta 3	127,2	985,3

En la Tabla 4.18 se muestran los valores de la integral J obtenidos mediante los tres métodos para cada probeta. Como se puede observar los valores de J obtenidos mediante la emisión acústica se aproximan más a los valores de J_0 que a los de J_Q aunque con diferencias considerables. Por otro lado los valores obtenidos mediante el DCG y el método de normalización muestran una mayor semejanza. A continuación se discuten las posibles razones que generan estas diferencias.

Tabla 4.18: Comparación de los valores de J obtenidos por tres métodos diferentes.

	DCG		Normalización		E.A
	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	$J_{E.A}$ [KJ/m ²]
Probeta 1	321,18	656,13	373,6	709,4	112,3
Probeta 2	121,28	242,97	87,8	241,7	153,64
Probeta 3	200,08	557,82	127,2	985,3	104,82

4.3. Discusión de los resultados obtenidos

4.3.1. Introducción

En la sección anterior fue evidenciado que existe una diferencia entre los valores de J obtenidos por cada método. En la presente sección se pondrán en discusión aquellos aspectos por los cuales se cree que puede darse esta diferencia, principalmente se pondrá el foco en el parámetro “ $M=2$ ” que acompaña a la tensión de fluencia efectiva en la pendiente de la línea de construcción. Así también se discutirá la naturaleza del evento característico registrado con Emisión Acústica durante los ensayos.

4.3.2. Influencia del parámetro “ M ” en el valor de la integral J

En la sección 4.2 se obtuvieron valores de la integral J mediante tres métodos: la Emisión acústica, el Doble Clip Gauge y el método de Normalización. Se definieron tres valores de J . Por un lado J_0 como la intersección de la línea de construcción, o “*Bluntig Line*”, con la curva de los pares de puntos $J-\Delta a$, por otro lado J_Q definido, al igual que en la norma ASTM E1820, como la intersección de Línea 0,2 con la curva de resistencia $J-R$, y finalmente J_{EA} que resulta de calcular J para la carga a la cual se da el evento característico en las señales de Emisión Acústica. Como se puede observar, en la Tabla 4.18 la mayor diferencia, para una probeta dada, se da entre los valores de J obtenidos mediante la curva de resistencia con el obtenido mediante la EA.

Tanto J_0 como J_Q son determinados mediante el uso de la “*Blunting Line*”, esta recta está definida en la norma ASTM E1820 según la Ecuación (3.39). Como se observa la pendiente depende de la tensión de fluencia efectiva del material (σ_Y) y del parámetro “ M ” previamente definido, que para la norma adopta un valor fijo igual a 2. El valor de $M = 2$ surgió del modelo puramente geométrico, que plantea que la punta de la fisura adopta una forma semicircular antes del inicio de crecimiento, sin embargo se informaron desviaciones respecto a la forma que adopta la fisura antes de comenzar a crecer y además que M es dependiente de la tensión en la punta de fisura y de las características de endurecimiento del material (Uikhopadhyay C. & Sasikala G., 2012). Para materiales de baja resistencia y alto endurecimiento por deformación en frío, se informó un valor de $M = 4$ (Mills W., 1981). Por otro lado, el código francés para el diseño de plantas nucleares sugiere un valor de $M=4$ para los aceros (Code RCC-MR, 2002).

A continuación se presentan las curvas de resistencia $J-R$, como así también los respectivos valores de J_0 y J_Q obtenidos para un valor de $M=3$ y $M=4$. La Figura 4.23 corresponde al método del DCG, mientras la Figura 4.24 al método de Normalización. En la Tabla 4.19 se comparan los nuevos valores obtenidos de J_0 y J_Q con J_{EA} .

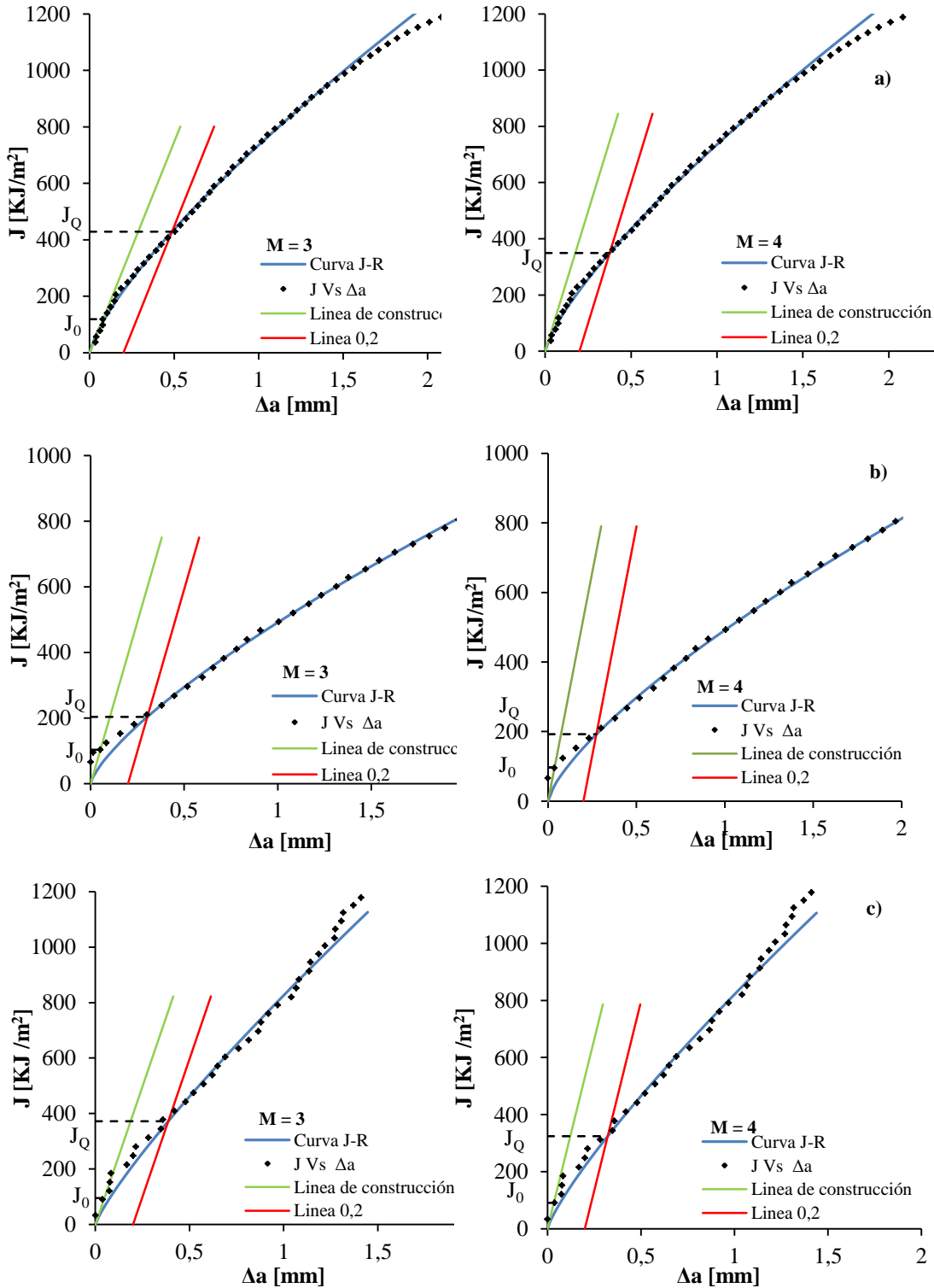


Figura 4.23: Valores de J_0 y J_Q obtenidos para valores de $M=3$ y $M=4$, sobre las curvas construidas con el DCG. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.

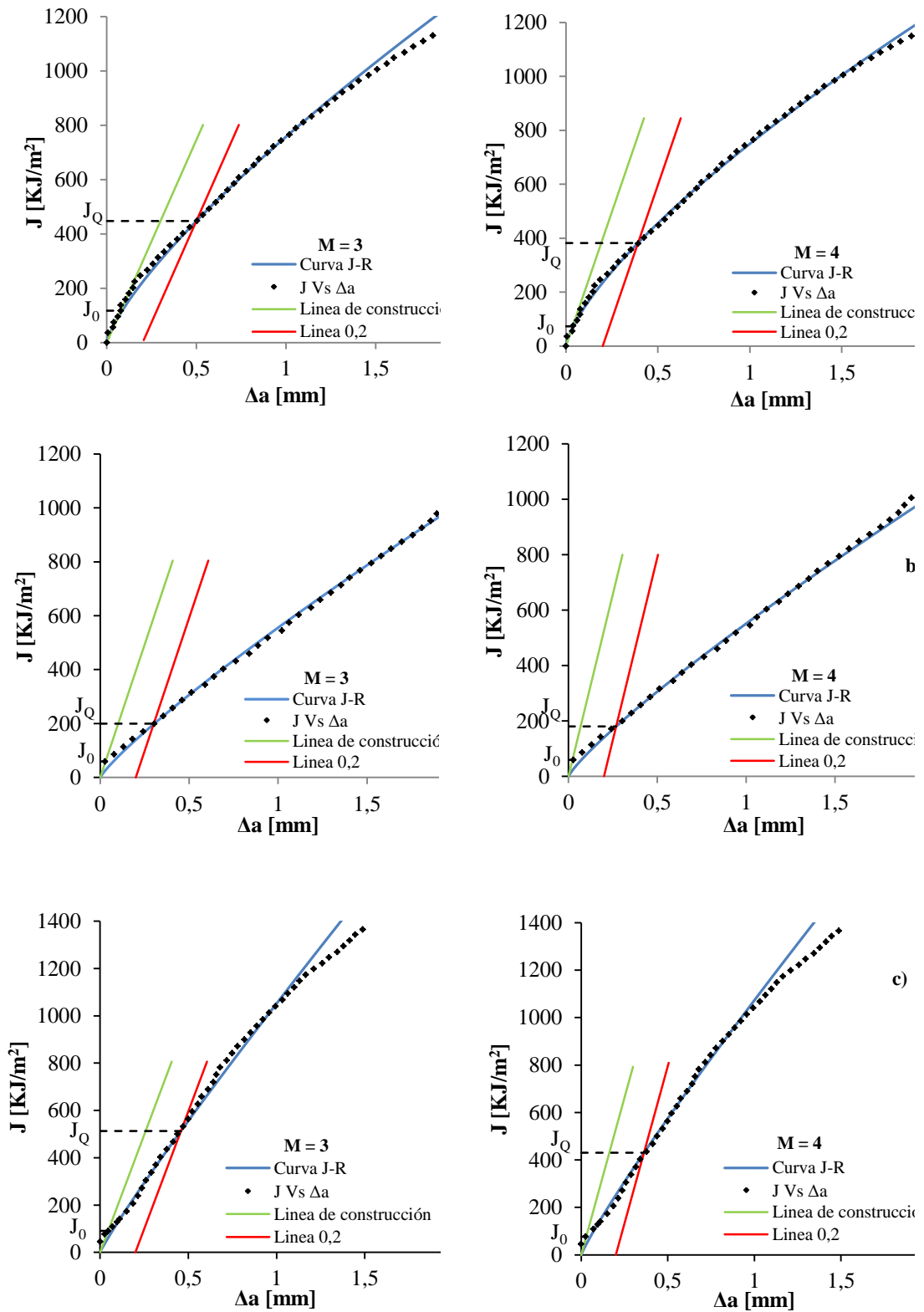


Figura 4.24: Valores de J_0 y J_Q obtenidos para valores de $M=3$ y $M=4$, sobre las curvas construidas con el método de Normalización. a) Probeta 1, b) Probeta 2, c) Probeta 3.

Tabla 4.19 Comparación de los valores de $J_{E.A}$ con los valores de J_0 y J_Q obtenidos para $M = 3$ y $M = 4$.

Probeta	DCG				Normalización				$J_{E.A}$ [KJ/m ²]
	M = 3		M = 4		M = 3		M = 4		
	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	J_0 [KJ/m ²]	J_Q [KJ/m ²]	
Prob 1	118,7	428,7	---	349,2	117,2	447,2	73,3	382,1	112,3
Prob 2	103,2	203,3	96,8	192,5	59,3	199,5	59,06	180	153,6
Prob 3	95,3	372,2	90,9	324,3	90,6	512,8	76,5	430,2	104,8

--- : No hay intersección de la recta de construcción con la curva $J-\Delta a$

Como se puede observar un valor de $M=3$ reduce la diferencia entre los valores J_0 y $J_{E.A}$ para la probeta 1 y 3, mientras que un valor de $M=2$ parecería ser apropiado para la probeta 2. Estos resultados permiten además tener una noción más acabada de lo conservativo que resulta el parámetro J , según la diferencia entre los valores J_0 y J_Q

4.3.3. Origen del evento característico.

Análisis preliminares como la correlación entre la carga y la energía de E.A, sección 4.2, nos dan una primera aproximación de que el evento característico podría estar asociado con el inicio de crecimiento estable de fisura, si bien esta evidencia es necesaria no fue considerada suficiente. Para dilucidar este punto se propuso realizar un ensayo complementario sobre una cuarta probeta.

El ensayo consistió en instrumentar una probeta prefisurada con sensores de E.A y someterla a una prueba de flexión en tres puntos hasta que se registre el evento característico. Una vez registrado el EvC se desmonta la probeta y se procede a realizar el teñido térmico, luego se monta nuevamente la probeta en la máquina, esta vez se instrumenta también el DCG y se continúa el ensayo hasta que el DCG evidencie un crecimiento de fisura. Finalmente se enfría la probeta en nitrógeno líquido y se produce una fractura frágil, esto permite evidenciar sobre la superficie de fractura la región de crecimiento estable de la zona de rotura frágil generada a temperaturas de nitrógeno líquido.

Las superficies de fractura de la probeta ensayada se analizaron en el microscopio electrónico de barrido (SEM, acrónimo de *Scanning Electron Microscope*) donde se buscaron indicios en la zona previa al teñido térmico que evidencien el inicio de crecimiento estable.

La probeta ensayada, “Probeta 4”, es un acero cuya composición química se muestra en la Tabla 4.20. Si bien no se trata del mismo material que las probetas originales, es apropiada para los fines prácticos del ensayo.

En la Figura 4.25 se muestran las imágenes de la superficie de fractura obtenidas con el SEM. La línea celeste indica la posición de la punta de fisura inicial, es decir hasta donde llego la prefisura por fatiga. Mientras que la línea roja indica hasta donde fue afectada la superficie por el teñido térmico.

Tabla 4.20: Composición química de la Probeta 4. [% en peso]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Probeta 4	0,041	0,343	1,34	0,023	0,01	0,149	0,193

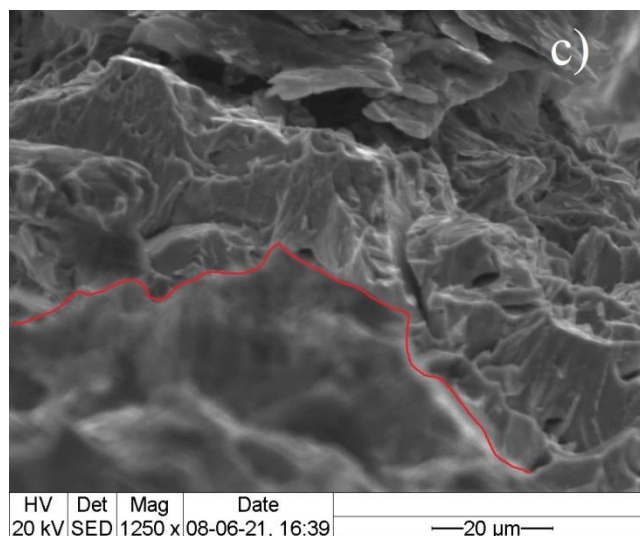
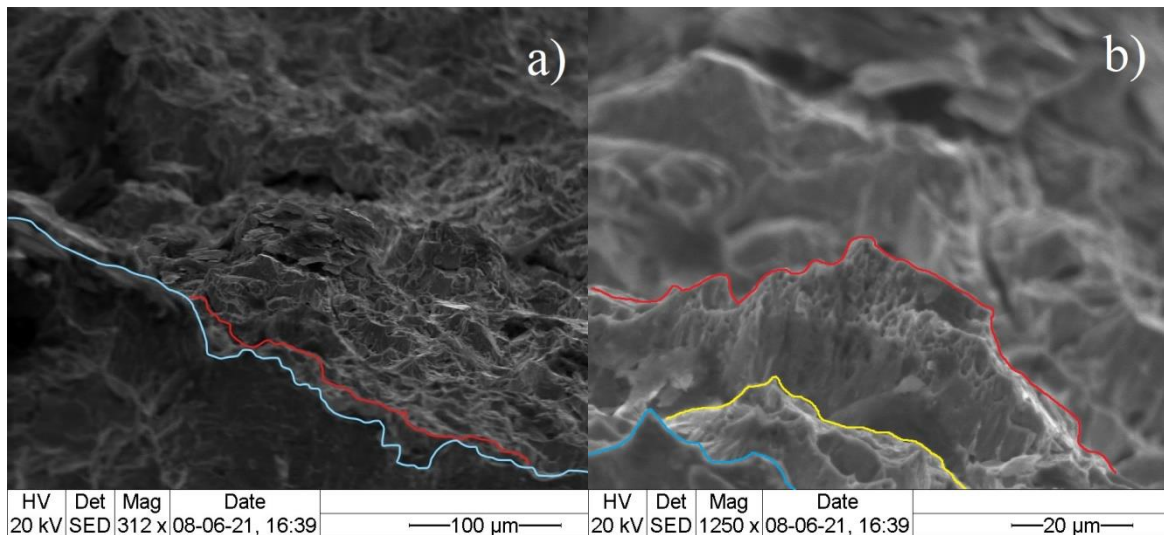


Figura 4.25: Superficie de fractura de la probeta 4 vista en el SEM

La imagen “a” de la Figura 4.25 es la zona central del frente de fisura, donde se puede apreciar el límite entre la prefisura y la zona afectada por el teñido térmico. La imagen “b” es un aumento de dicha zona donde en el plano en foco se aprecia el crecimiento inicial, delimitado por la línea amarilla, el cual se dio durante el evento característico. Mientras que en la imagen “c” el foco se hace en el plano más bajo, donde se aprecia la fractura frágil generada a temperaturas de nitrógeno líquido

Esto permitió establecer que el inicio de crecimiento se dio en la zona previa al teñido térmico lo que nos proporciona información para poder establecer al evento característico como el inicio de crecimiento estable.

Otro aspecto importante que se pudo destacar con este análisis, gracias a que la probeta se cargó en dos oportunidades, fue el cumplimiento del Efecto Káiser. El mismo establece que la emisión acústica es irreversible, esto quiere decir que un material que fue sometido a un estado de carga, no emitirá señales de emisión acústica nuevamente hasta que el nivel de sollicitación no exceda el nivel máximo alcanzado en el ensayo anterior (Molina G. A. & Gonzalez M. E., 2015). En la Figura 4.26 se muestran las dos etapas de carga. Como se puede observar en la segunda etapa la actividad acústica comienza a los 11 segundos, luego de superar los 2970 N alcanzados en el instante del EvC, momento en que se frenó la primera etapa de carga. Esto verifica el cumplimiento del efecto Káiser para este material.

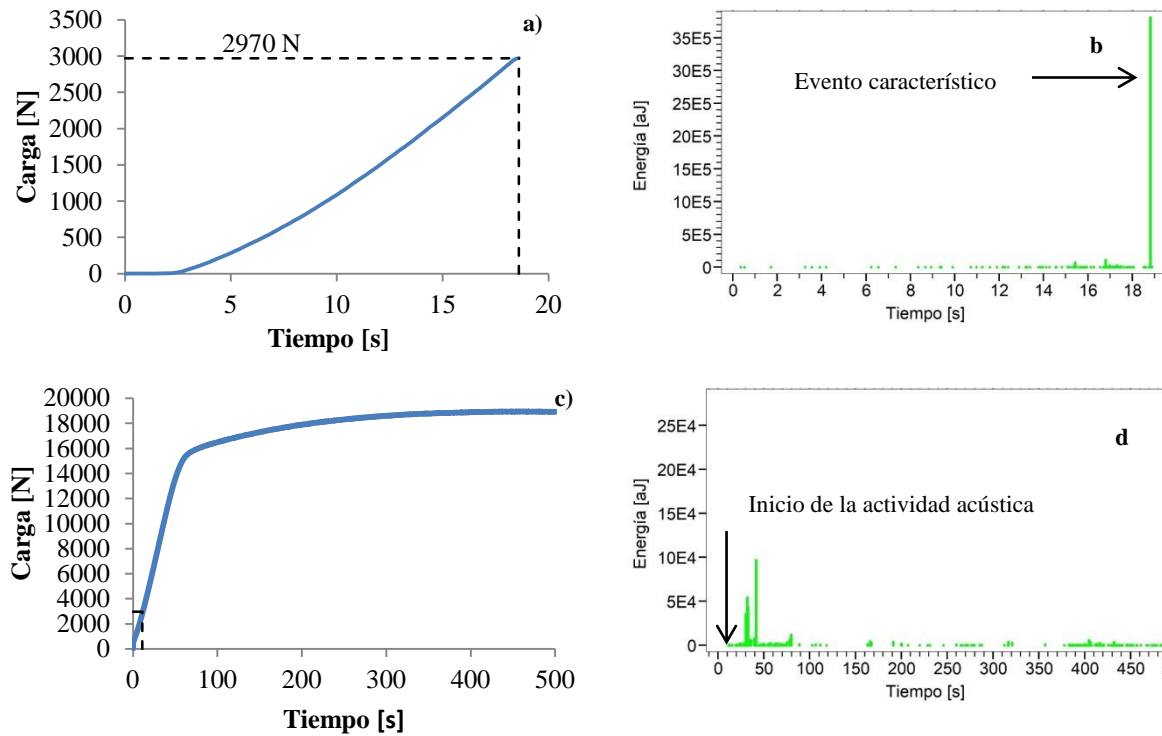


Figura 4.26: Etapas de carga realizadas durante la prueba y sus respectivas actividades acústicas a) y b): Primera etapa, c) y d) Segunda etapa. b) y d) Imágenes extraídas del software Vallen.

En esta sección se puso en discusión la influencia del parámetro M en método para la determinación del valor de la integral J , como así también se demostró que el evento característico puede ser asociado al inicio de crecimiento estable. De esta manera se puede decir que J_{EA} corresponde el inicio del crecimiento estable propiamente dicho y no así con J_Q . A su vez se evidencia lo conservativo que resulta utilizar el valor de J en el inicio de crecimiento, ya que la fisura puede crecer sin alcanzar condiciones de inestabilidad.

5. CONCLUSIONES

Durante la realización del Proyecto Integrador Profesional se aplicaron de manera conjunta muchos de los conocimientos adquiridos durante la carrera para lograr cumplir con los objetivos propuestos inicialmente. El trabajo estuvo enfocado en poder estudiar los procesos de la Mecánica de Fractura Elastoplástica que caracterizan el inicio de crecimiento de fisura, y su relación con el fenómeno físico de dicho inicio, en términos de la integral J . Para tal fin se ensayaron tres probetas de acero ASTM A514 Gr T con un grado de deformación plástica previa del 10% aproximadamente. Mediante la técnica de Emisión Acústica se pudo registrar un evento de gran amplitud y energía que se asoció al inicio de crecimiento y se pudo calcular un valor de J para el mismo (J_{EA}). A su vez se construyeron las curvas de resistencia para cada probeta y se definieron los valores J_0 y J_Q siguiendo los estándares de la norma ASTM E1820.

Comparando los valores de J se pudo observar una diferencia apreciable entre los valores J obtenidos mediante los distintos métodos. Al estudiar los factores que daban lugar a estas discrepancias, se pudo analizar la influencia del parámetro M utilizado en la línea de construcción ($J = M\sigma_Y\Delta a$), la cual define J_0 y J_Q . Se construyeron las curvas de resistencia y se obtuvieron valores de J para valores de $M = 3$ y $M = 4$, esto permitió inferir que utilizar $M=2$ como valor único no resulta apropiado.

Además se realizó un ensayo adicional para finalmente asociar el evento característico con el inicio de crecimiento estable de fisura. Las imágenes extraídas del SEM arrojaron evidencia de que el momento en el que se da el EvC se corresponde con el inicio de crecimiento. Por otro lado este ensayo permitió verificar el cumplimiento del efecto Káiser.

En resumen, en base a los resultados que se obtuvieron a partir de los ensayos de flexión realizados sobre tres probetas SE(B), podemos concluir que:

- Mediante la Emisión Acústica se logró detectar un evento de gran energía (EvC) antes de alcanzar la carga máxima, tal evento es considerado como el inicio de crecimiento estable de fisura.
- El valor de J en este evento (J_{EA}), es el parámetro relativo al real comienzo de crecimiento de fisura y comparable con el valor de J_0 .
- El valor de J_0 , es dependiente del parámetro M , que define la pendiente de la línea de construcción, en tanto que el valor J_{EA} es independiente de este parámetro. Por lo

tanto la comparación de los valores J_0 y J_{EA} permite la evaluación de la pertinencia del valor de la pendiente.

- Para un valor de $M = 3$ la Probeta 1 y 3 mantienen una diferencia del 6 y 10% entre J_0 y J_{EA} . Mientras que se registró una diferencia del 20% para la probeta 2 con $M = 2$.
- Solo fue analizado el evento de E.A de mayor intensidad, no obstante, previo a dicho evento se registraron eventos de menor energía los cuales en principio podrían asociarse a la gran deformación plástica producida antes del inicio del crecimiento estable.
- Se pudo verificar el cumplimiento del efecto Kaiser mediante el ensayo de la curta probeta.

Este trabajo nos permitió presentar un nuevo enfoque para obtener un valor de J característico del material a partir de la técnica de Emisión Acústica. En base a los ensayos realizados, las cuatro probetas presentaron un evento característico asociable al inicio de crecimiento estable. Los resultados obtenidos alientan a continuar estudios en este sentido y se proponen las siguientes líneas como trabajo futuro:

- Aplicar la metodología a una mayor cantidad de probetas de acero del mismo material con la misma historia termomecánica a fin de poder garantizar la fiabilidad de la E.A como metodología para determinar un valor de J
- Aplicar la metodología a series de probetas con características de comportamiento elastoplástico de marcada diferencia a fin de analizar la capacidad de detección del método y su confiabilidad.
- Estudiar la aplicabilidad de la técnica a materiales que presentan mayor dificultad para la determinación del inicio del crecimiento, tales como polímeros y compuestos de matriz polimérica.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, T. (2017). *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Aranda. J. L. (2002). *Mecánica de la fractura*. Argitalpen zerbitzua.
- Ernst H., & Paris P. (1979). *Analysis of Load- Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material Properties*. American Society for Testing and Materials.
- Fitzgerald E.R. (1960). *Mechanical resonance dispersion and plastic flow in crystalline solids*. J Acoust Soc Am.
- Grosse C.U., & Linzer L.M. (2008). *Signal-based AE analysis, in Acoustic Emission Testing*. Springer.
- Gu A., & Sun L. (2019). *Acoustic Emission Characteristics Based on Energy Mode of IMFs*. Springer.
- Herrera R., & Landes J. D. (1990). *Direct J-R Curve Analysis: A Guide to the Methodology*. American Society for Testing and Materials,.
- Hertzberg. (2013). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. Wiley John Wiley & Sons, Inc.
- Landes J. D., & Zhou Z. (1991). *Normalization Method for Developing J-R Curves with the LMN Function*. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA.
- Lysak, M. V. (1996). *Development of the theory of acoustic emission by propagating cracks in terms of fracture mechanics*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 55, no. 3, p. 443–452.
- Manziona , P., & Perez Ipiña, J. (1991). *Sensitivity analysis of the double clip gauge method*. Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structure, vol. 14, no. 9, pp. 887-896.
- Mills W. (1981). *On the Relationship Between Stretch Zone Formation and the J Integral for High Strain-Hardening Materials*. Journal of Testing and Evaluation, no. 1.
- Molina G. A., & Gonzalez M. E. (2015). *Emisión Acústica Nivel I y II*. Femetal.
- Paranjpe. S. A. (1979). *Interrelation of crack opening displacement and J-integral*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 11, no. 1, pp. 43-53.
- Perez Ipiña, J. (2004). *Mecánica de fractura*. Alsina.

Uikhopadhyay C., & Sasikala G. (2012). *Acoustic emission during fracture toughness tests of SA333 Gr.6 steel*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 96.