

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TENACIDAD A  
LA FRACTURA DEL ACERO API 5L X65 MEDIANTE EL  
MÉTODO DE ENSAYO ASTM E 1820**

Tesis para optar el Título de ingeniero Mecánico,  
que presenta el bachiller:

DANIEL ANDRE CALERO ZAVALA

**ASESOR:** Mg. Ing. Aníbal Rozas Gallegos

Lima, Setiembre del 2015

## RESUMEN

Se describe la tenacidad a la fractura como la propiedad que define el comportamiento de un material cuando este se encuentra fisurado, el estudio de estas propiedades de los materiales se ha convertido en uno de los campos de estudio de los últimos años debido a que al conocer esta propiedad se puede afinar los parámetros de diseño planteados para los sólidos continuos.

Uno de los métodos de determinación de estos parámetros es experimentalmente, mediante la pre fisuración por fatiga de probetas de tal manera que se pueda desarrollar una grieta en un ambiente de laboratorio, y así poder desarrollar su posterior ensayo al someter la probeta agrietada a tracción.

En el presente trabajo de tesis, se ha determinado experimentalmente el valor de los parámetros más importantes de tenacidad a la fractura  $K$ ,  $J$  y CTOD para las tuberías de API 5L de grado X65, usadas ampliamente en el transporte de hidrocarburos. En particular, se busca determinar el valor de la integral  $J$  debido a que ésta plantea una mayor cantidad de información de la cual se puede derivar los otros dos parámetros. La muestra se caracterizó bajo ensayos de tracción, impacto y análisis químico, y finalmente se realizó el pre fisurado por fatiga para las probetas desarrolladas por electro erosión antes de los ensayos de tracción.

En el último capítulo, se muestran los resultados obtenidos experimentalmente; los cuales son validados con los criterios de ASTM E 1820. Asimismo, se determinaron los resultados a partir de los ensayos de impacto propuestos por API 579 y que se comparan con los resultados de ASTM E 1820. Por último, se estudió el cambio en la cara de la grieta, señalándose las etapas de pre fisura y rotura para los diferentes ensayos realizados.

## INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL ARTE	3
1.1 Mecánica de fractura	3
1.1.1 Efecto de las Propiedades del Material en la Fractura	4
1.1.2 Proceso general de Fatiga	5
1.2 Mecánica de Fractura Elasto-Plástica	6
1.2.1 CTOD: Desplazamiento de la apertura de frente de grieta	6
1.2.2 Integral $J$	8
1.2.3 Relación entre $J$ y CTOD	9
1.3 Determinación experimental del valor de la tenacidad a Fractura	10
1.3.1 Orientación de la muestra	10
1.3.2 Caracterización de $KIC$	11
1.3.3 Ensayos para la Curva $KIC - R$	12
1.3.4 Caracterización de $J$	13
1.3.5 Tenacidad de fractura a partir del Ensayo Charpy	14
1.3.6 Normas para Medición de Tenacidad a la Fractura	14
1.4 Aplicaciones en ingeniería	15
1.4.1 Diseño y Selección de materiales	16
1.4.2 Diseño frente a la fractura	16
1.5 Propiedades de la Muestra Según API 5L X65 PSL2	17
1.5.1 Proceso de fabricación	18
1.5.2 Propiedades Químicas	18
1.5.3 Propiedades Mecánicas	20
1.5.4 Ensayo de Impacto Charpy CVN para Tubería PSL 2	20
1.5.5 Dimensiones, masa y tolerancias	21
1.6 Estándar para Medición de Tenacidad a la Fractura : ASTM E 1820	22
1.6.1 Conceptos Generales	22
1.6.2 Configuración de la muestra	22
1.6.3 Preparación de Probeta	23
1.6.4 Pre fisuración de la Muestra	24

1.6.5	Procedimiento básico de rotura	26
1.6.6	Procedimiento de Curva de Resistencia	26
1.6.7	Medición Óptica del Tamaño de grieta	27
1.6.8	Análisis de Resultados	28
<b>2.</b>	<b>METODOLOGIA Y EXPERIMENTACION</b>	<b>29</b>
2.1	Caracterización de la Muestra	29
2.1.1	Dimensiones de la muestra	29
2.1.2	Análisis Químico	29
2.1.3	Ensayo de Tracción	30
2.1.4	Ensayo de Impacto Charpy	31
2.1.5	Ensayo de metalografía	31
2.2	Determinación experimental de la Tenacidad a la Fractura	31
2.2.1	Preparación de Probeta	31
2.2.2	Pre fisuración de muestra	33
2.2.3	Ensayo de Rotura	34
2.2.4	Cálculo de J para el Procedimiento Curva de Resistencia	36
2.2.5	Delimitación del gráfico de la Curva de Resistencia	39
2.2.6	Evaluación de $J_{IC}$ y $K_{JIC}$	40
2.2.7	Cálculo de $J_Q$ Interno	41
2.2.8	Calificación de los resultados	44
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>47</b>
3.1	Caracterización de la Muestra	47
3.1.1	Dimensiones de la muestra	47
3.1.2	Análisis Químico	47
3.1.3	Ensayo de Tracción	48
3.1.4	Ensayo de Impacto Charpy	49
3.1.5	Ensayo de metalografía	49
3.2	Ensayos de Tenacidad a la Fractura	51
3.2.1	Preparación de Probeta	51
3.2.2	Pre fisuración de muestra	51
3.2.3	Ensayo de Rotura	53
3.2.4	Cálculo de J	56
3.2.5	Determinación de la Curva de Resistencia.....	58

3.2.6	Ajuste de longitud grieta inicial real : $a_{0q}$	59
3.2.7	Medición óptica de la longitud de grieta real, $a_{0q}$	62
3.2.8	Cálculo de $J_Q$ interno	63
3.2.9	Evaluación de $J_{IC}$ y $K_{JIC}$	66
3.2.10	Comprobación de los criterios de validez de ASTM E 1820	69
3.2.11	Fractografía de la fisura	71
3.3	Determinación de tenacidad a la fractura basado en ensayos de impacto Charpy	72
CONCLUSIONES		
BIBLIOGRAFIA		
ANEXOS		



## Índice de Figuras

Figura 1.1: Diagrama de estudios de mecánica de Fractura	4
Figura 1.2: Efecto de la tenacidad a la fractura en la falla de un mecanismo	5
Figura 1.3: Grieta enromada y CTOD ( $\delta$ )	7
Figura 1.4: Gráfico esquemático de la curva	8
Figura 1.5: Denotación para la orientación para	11
Figura 1.6: Tres tipos de comportamiento en curvas	12
Figura 1.7: Análisis de la relación entre tamaño de grieta,	17
Figura 1.8: Configuraciones de probeta para ensayos	23
Figura 1.9: Modelos de probeta Compacta según ASTM E 1820	24
Figura 1.10: Pre fisuración por fatiga de una muestra de	25
Figura 2.1: Foto de la muestra en Laboratorio de Materiales PUCP	29
Figura 2.2: Probetas de Tracción	30
Figura 2.3: Dimensiones de la probeta CTOD de acuerdo con ASTM E 1820	32
Figura 2.4: Primera etapa, Mecanizado en el	32
Figura 2.5: Segunda etapa, electroerosión de Muesca	33
Figura 2.6: Desplazamiento plástico	39
Figura 2.7: Curva J-R típica	40
Figura 2.8: Definición de líneas de construcción para calificación de datos	42
Figura 2.9 Definición de regiones para la Calificación de Datos	43
Figura 3.1: Acercamiento 100x de muestra longitudinal	50
Figura 3.2 Acercamiento a 500x (lado izquierdo) y 1000x (lado derecho)	50
Figura 3.3 Probeta CTOD con galgas de medición de apertura de boca	51
Figura 3.4. Foto de grieta generada en probeta CTOD 2.	52
Figura 3.5. Posición correcta de galgas extensométricas para ensayo de rotura.	53
Figura 3.6. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°1.	54
Figura 3.7. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°2.	54
Figura 3.8. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°3.	55
Figura 3.9. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°4.	55
Figura 3.10. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°5.	56
Figura 3.11. Gráfico $J$ vs $\Delta a$ de los Ensayos 1,2, 3 y 4.	58
Figura 3.12. Gráfico $\Delta a$ vs. $J$ de Ensayo de Rotura N°1.	59

Figura 3.13. Gráfico $\Delta a$ vs. J de Ensayo de Rotura N°2	60
Figura 3.14. Gráfico $\Delta a$ vs. J de Ensayo de Rotura N°3	60
Figura 3.15. Gráfico $\Delta a$ vs. J de Ensayo de Rotura N°4	61
Figura 3.16. Medición de tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°1	62
Figura 3.17. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°2	62
Figura 3.18. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°3	63
Figura 3.19. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°4	63
Figura 3.20. Gráfico J vs $\Delta a$ de Ensayo de Rotura N°1	65
Figura 3.21. Gráfico J vs $\Delta a$ de Ensayo de Rotura N°2	65
Figura 3.22. Gráfico J vs $\Delta a$ de Ensayo de Rotura N°3	66
Figura 3.23. Resultados de $J_Q$ y $J_{IC}$	69
Figura 3.24. Acercamiento 23x (ETD) en SEM de cara de grieta de Probeta 2	71
Figura 3.25. Acercamiento 23x (ETD) en SEM de cara de grieta de Probeta 3	72
Figura 3.26. Deformación final de las probetas de ensayo de impacto Charpy	73

## Índice de Tablas

Tabla 1.1: Estándares más conocidos para Medición de Tenacidad a la Fractura .....	15
Tabla 1.2: Composición Química para tubería PSL 2 .....	19
Tabla 1.3: Propiedades mecánicas de API 5L X65.....	20
Tabla 1.4: Energía absorbida por ensayo CVN para Grado X65 .....	21
Tabla 1.5: Rango de diámetro exterior y espesores permisibles por API 5L.....	21
Tabla 2.1: Datos de entrada al Software TestXpert II para pre fisuración .....	33
Tabla 2.2: Datos de entrada al Software TestXpert II para ensayo de rotura.....	35
Tabla 3.1: Dimensiones de la muestra obtenida.....	47
Tabla 3.2: Resultados del A.Q. según ASTM E 415 .....	47
Tabla 3.3: Resultados de Ensayos Mecánicos .....	48
Tabla 3.4: Resultados de Ensayos de Impacto Charpy .....	49
Tabla 3.5: Dimensiones finales de probetas pre fisuradas.....	52
Tabla 3.6: Dimensiones finales de probetas pre fisuradas.....	57
Tabla 3.7: Valores límite para $J_{max}$ y $\Delta a_{max}$ .....	58
Tabla 3.8: Valores estimados de la aproximación polinómica.....	61
Tabla 3.9: Valores finales de $J_i$ vs $\Delta a$ .....	64
Tabla 3.10 Resultados de $\Delta a_Q$ y $J_Q$ .....	67
Tabla 3.11 Verificación de datos y cálculo de $J_{KIc}$ .....	68
Tabla 3.12. Mediciones de tamaño de grieta inicial y final .....	70
Tabla 3.13 Comparación entre extensión de grieta calculada y grieta real .....	70
Tabla 3.14: Valores determinados por API579 .....	73

## Lista de símbolos

Símbolo	Unidad	Designación
$a$	mm	Longitud inicial de grieta (en caso de pre fisura, un valor menor a $a_o$ )
$a_f$	mm	Longitud final de grieta ( $a_o + \Delta a$ )
$a_i$	mm	Longitud instantánea de grieta
$a_o$	mm	Longitud inicial de grieta
$a_{oq}$	mm	Longitud inicial de grieta estimado de la compliancia
$a_p$	mm	Longitud física de la grieta
$\Delta a$	mm	Extensión estable de grieta
$\Delta a_{max}$	mm	Límite de extensión de grieta para determinación de $\delta$ o $J$
$\Delta a_Q$	mm	Extensión de grieta calificada por ASTM E 1820
$A_{pl}$	mm <sup>2</sup>	Área bajo la curva del gráfico de la integral J
$A_o$	mm <sup>2</sup>	Área de sección transversal original de probeta de tracción
$a_{oq}$	mm	Longitud provisional inicial de grieta
$b$	mm	Ligamento remanente de probeta (no fisurada)
$b_o$	mm	La distancia del frente original de fisura hasta la parte posterior de la muestra ( $b_o = W - a_o$ )
$B$	mm	Espesor de probeta
$B_N$	mm	Espesor de probeta en la zona ranurada.
$C_1$	-	Número adimensional resultado de la regresión lineal logarítmica
$C_2$	-	Número adimensional resultado de la regresión lineal logarítmica
$C_{C(i)}$	mm/N	Compliancia elástica en el punto $i$
$C_{LL}$	mm/N	Compliancia elástica experimental de la probeta
$\Delta_c$	mm	Extensión longitudinal de probeta de tracción
$CE_{Pcm}$	%	Porcentaje de carbono equivalente para $C \leq 0.12\%$
$CE_{IIW}$	%	Porcentaje de Carbono Equivalente para $C \geq 0.12\%$
$CMOD$	mm	Desplazamiento de la apertura de boca de grieta
$D$	mm	Mitad de la distancia inicial entre las galgas extensométricas
$dm$	mm	Distancia medida por las galgas extensométricas
$\delta$	mm	CTOD: Desplazamiento de apertura de frente de grieta, Crack Tip Opening Displacement
$\delta_c$	Mm	Desplazamiento crítico de apertura de frente de grieta
$E$	GPa	Módulo de elasticidad
$\varepsilon$	-	Alargamiento
$F$	N	Fuerza aplicada
$G$	J	Tasa de liberación de energía

$H^*$	mm	Mitad de la distancia inicial de los puntos de carga
$J$	MJ/m <sup>2</sup>	Equivalente experimental a J
$J_{IC}$	MJ/m <sup>2</sup>	Integral J (valor único)
$J_{pl}$	MJ/m <sup>2</sup>	Componente plástico de la integral J
$J_{el}$	MJ/m <sup>2</sup>	Componente elástico de la integral J
$J_F$	MJ/m <sup>2</sup>	Valor final de integral J para cálculo de $K_F$
$J_Q$	MJ/m <sup>2</sup>	Valor de la tenacidad a la fractura calificado por ASTM E 1820
$K$	MPa $\sqrt{m}$	Factor de intensidad de esfuerzo
$K_{IC}$	MPa $\sqrt{m}$	Tenacidad a la fractura en un plano de esfuerzo.
$K_{(i)}$	MPa $\sqrt{m}$	Factor de concentración de esfuerzos para el instante $i$
$K_{JIC}$	MPa $\sqrt{m}$	Tenacidad a la fractura determinada a partir de la integral J
$K_Q$	MPa $\sqrt{m}$	Tenacidad a la fractura dependiente de la geometría de la probeta
$K_{pl}$	MPa $\sqrt{m}$	Componente plástica de la tenacidad a la fractura
$K_V$	J	Energía Absorbida en el ensayo de impacto
$K_{MAX}$	MPa $\sqrt{m}$	Factor de intensidad de esfuerzos máximo
$K_F$	MPa $\sqrt{m}$	Factor de concentración de esfuerzos final
$L_o$	mm	Distancia original de galgas en probeta de tracción
$m$	-	Factor geométrico adimensional definido por las dimensiones de las probetas.
$(N_p)_p$	J	Propagación inicial de la grieta por la zona plástica
$(N_p)_e$	J	Propagación de la grieta hasta el fallo final
$\eta$	-	Constante adimensional de la deformación de grieta
$\eta_{el}$	-	Componente elástica de la constante adimensional, $\eta$
$\eta_{pl}$	-	Componente plástica de la constante adimensional
$P$	N	Fuerza a la que se somete la probeta
$P_{(i)}$	N	Fuerza a la que se somete la probeta en el instante $i$
$P_m$	N	Fuerza de compresión a la que se somete la probeta en la prefisura
$P_{MAX}$	N	Carga máxima a la que se somete la probeta
$P_Q$	N	Carga que precede la carga máxima en el ensayo de tenacidad
$P_{MIN}$	N	Carga mínima a la que se somete la probeta
$\Delta P$	N	Incremento de fuerza en ensayo de tracción
$R$	-	Ratio de Cargas
$\sigma$	MPa	Tensión nominal aplicada
$\sigma_{TS}$	MPa	Esfuerzo de tracción
$\sigma_{ys}$	MPa	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_Y$	MPa	$\sigma_Y = 0.5 * (\sigma_{ys} + \sigma_{TS})$

$\sigma_{YS}^f$	MPa	Esfuerzo de fluencia en la pre fisura por fatiga
$\sigma_{YS}^T$	MPa	Esfuerzo de fluencia en la temperatura de ensayo
$\theta_i$	°	Ángulo de rotación del cuerpo rígido de la probeta
$U_c$	J	Energía absorbida en la rotura
$U_{c(el)}$	J	Componente elástico de la energía absorbida en la rotura
$U_p$	J	Componente plástico de la energía absorbida en la rotura
$\nu$	-	Módulo de Poisson
$W$	mm	Ancho de probeta



## INTRODUCCIÓN

La tenacidad a la Fractura es una propiedad de los materiales estudiada con el objetivo de establecer una relación matemática entre la tenacidad, el tamaño de grieta y las tensiones. Actualmente, es posible determinar experimentalmente parámetros característicos de la Mecánica de la Fractura como son K, J y CTOD para diferentes comportamientos de los materiales. Esto ha desarrollado diferentes métodos de determinación experimental entre los cuales se encuentra el método de ensayos ASTM E 1820, método sobre el cual se plantea el presente trabajo.

El contemplar el estudio de estas características para las tuberías API 5L, muy usadas en el transporte de hidrocarburos, sirve de base para poder plantear planes de gestión de mantenimiento, mejor dimensionamiento y tamaños de grieta tolerables para su inspección y control de calidad, lo que puede generar beneficios económicos a largo plazo.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos; el primero nos proporciona un enfoque global de la mecánica de fractura, sus parámetros característicos. Se explica el método de determinación de estos parámetros y su uso aplicado en la ingeniería y selección de materiales. Finalmente se recopila la información necesaria para poder validar la muestra obtenida por el Laboratorio de Materiales, así como las propiedades que plantea el Instituto Americano de Piping, API, en su estándar API 5L para el grado X65.

En el segundo capítulo, se detalla los procedimientos de caracterización de muestra como son el ensayo de tracción, ensayo de impacto y análisis químico. Asimismo, se detalla el procedimiento planteado por ASTM E 1820 para la determinación de los parámetros de tenacidad a la fractura, presentando las fórmulas de las principales variables necesarias así como los procedimientos seguidos de acuerdo al comportamiento de cada una de las probetas durante sus respectivos ensayos.

En el tercer capítulo se procede a mostrar y analizar los resultados obtenidos de cada ensayo de tal manera que se cumpla con los objetivos de la tesis. A través de la descripción de los procesos experimentales (ensayos de tracción, análisis químico, ensayo de impacto, pre fisuración por fatiga) y la presentación de resultados se logra determinar el valor para los diferentes parámetros de tenacidad a la fractura de las tuberías API 5L X65.

Finalmente, en el cuarto capítulo se desarrollan y presentan las conclusiones del trabajo realizado en la tesis.

## CAPITULO I

### 1. ESTADO DEL ARTE

#### 1.1 Mecánica de fractura

La mecánica de la fractura es la rama de la mecánica de sólidos deformables encargada del estudio de la estabilidad estructural de materiales. La mecánica de fractura considera el efecto de los defectos semejantes a fisuras (tanto en micro como en macro escala) sobre la integridad estructural. Se basa en la suposición de que fisuras o defectos semejantes a fisuras están inicialmente presentes, o podrían desarrollarse durante el servicio.

En un criterio simple, la fractura está dada por la condición de que una fisura se propague. La mecánica de la fractura busca cuantificar las combinaciones críticas de tensión y tamaño de fisura que produzcan la extensión de la misma [1].

Los tres parámetros importantes que analiza la mecánica de fractura son:

1. La tensión global aplicada sobre el componente o estructura
2. Las propiedades de resistencia a la fractura, características del material
3. El tamaño de cualquier defecto presente semejante a una fisura

La figura 1.1 muestra un diagrama simplificado del campo de estudio de la mecánica de fractura. La mayoría del trabajo inicial fue aplicable solo en los materiales lineales elásticos bajo condiciones cuasiestáticas, mientras que los trabajos siguientes buscaron profundizar otros tipos del comportamiento del material. La mecánica de la fractura elástico-plástico considera que la deformación bajo condiciones cuasiestáticas, mientras que la mecánica de fracturas viscoplásticas, viscoelásticas y

dinámicas incluyen el tiempo como variable. Se ha considerado una línea punteada entre la mecánica de fractura dinámica y lineal elástica ya que se está desarrollando trabajos relacionando ambos temas [2].

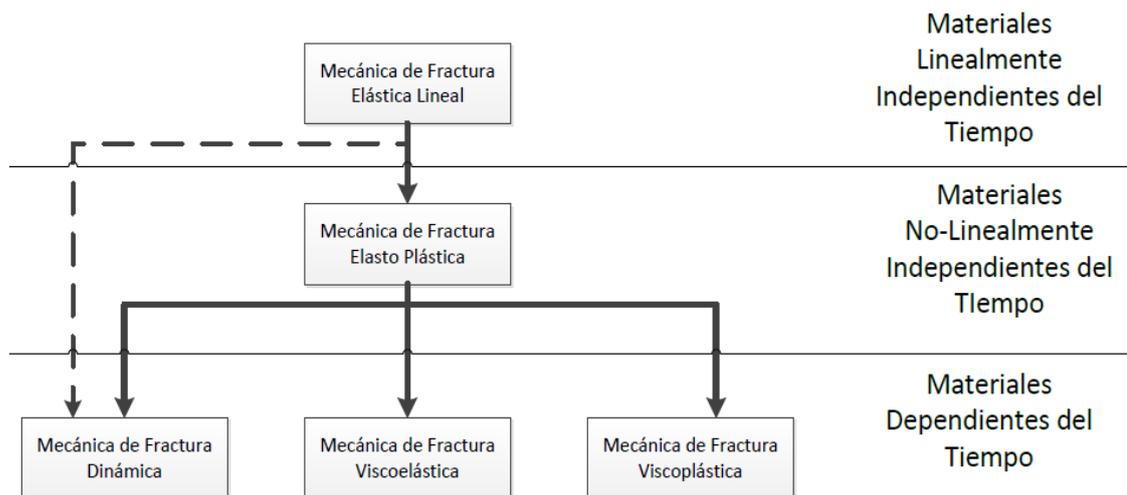


Figura 1.1: Diagrama de estudios de mecánica de Fractura

La mecánica de la fractura permite la mejora de los procesos de fabricación, inspección de control de propagación de defectos previo al fallo de componentes y diseño de productos. En sus estudios se aplican las teorías de elasticidad y plasticidad a los defectos cristalográficos microscópicos de los materiales y así poder predecir la fractura macroscópica en los componentes.

### 1.1.1 Efecto de las Propiedades del Material en la Fractura

Si se considera una plancha fisurada que está cargada hasta la falla, se muestra la figura 1.2 como un gráfico esquemático del esfuerzo de falla versus la tenacidad a la fractura  $K_{IC}$ . Para los materiales con baja tenacidad, la fractura frágil será la que gobierne el mecanismo de falla, y el esfuerzo crítico variará linealmente con  $K_{IC}$ . Para valores de tenacidad muy altos, la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM) no es válida y la falla es gobernada por las propiedades de fluencia del material. En valores intermedios de tenacidad, hay una transición entre una fractura frágil bajo condiciones lineal-elásticas y sobrecarga dúctil. La mecánica de fractura no lineal lleva a una diferencia entre LEFM y el colapso. Si la tenacidad es baja, se puede aplicar LEFM al

problema, pero si la tenacidad es suficientemente alta, la mecánica de fractura deja de ser relevante al problema porque el esfuerzo a la falla es insensible a la muesca; un análisis simple de límite de carga es todo lo que se necesita para predecir el esfuerzo de falla en un material con una tenacidad a la fractura muy alta.

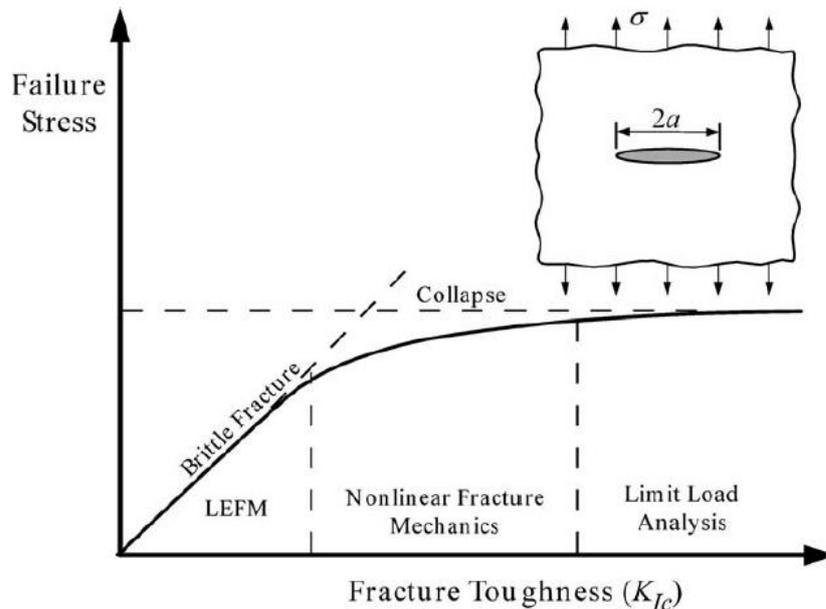


Figura 1.2: Efecto de la tenacidad a la fractura en la falla de un mecanismo<sup>1</sup>

### 1.1.2 Proceso general de Fatiga

Se puede diferenciar del proceso general de la fatiga tres etapas que se presentan sucesivamente previas a la rotura del componente. Estas tres etapas<sup>2</sup> son:

1. Período de nucleación e iniciación de la grieta en zonas en las que las concentraciones de tensión provocan deformaciones plásticas cíclicas,  $N_i$  (medido en número de ciclos). Se trata, por tanto, de una acumulación de daño plástico sobre ciertos accidentes de la microestructura, defecto de superficie o de volumen de la masa metálica, que origina la aparición de una grieta o fisura de frente o borde de propagación afilado.
2. Propagación inicial de la grieta a través de la zona plástica en que se originó,  $(N_p)_p$ .

<sup>1</sup> Obtenida del libro *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (2005) Pág. 17

<sup>2</sup> Extraído del libro *Mecánica de Fractura* (2002). Pág. 183.

3. Propagación de la grieta en la pieza, fuera de la zona de influencia de la concentración de tensiones originaria, en régimen macroscópicamente elástico,  $(N_p)_e$ , hasta el fallo final.

## 1.2 Mecánica de Fractura Elasto-Plástica

Es importante reconocer que la mecánica de fractura elástica lineal (MFEL) es válida para el estudio de la Mecánica de Fractura, sus limitaciones solo a una pequeña región alrededor de frente de grieta hacen difícil el poder caracterizar algunos materiales. La principal ventaja de la mecánica de fractura elasto-plástica (MFEP), mencionada en la Figura 1.1, es la posibilidad de trabajar con grandes deformaciones antes de la fractura, siendo éstas no-lineales, viscoplásticas y plásticas como el caso de los aceros. La MFEP plantea dos conceptos importantes,  $CTOD_c$ , desplazamiento de la apertura del frente de grieta, y la integral  $J_c$  necesarios para el estudio del comportamiento de los aceros tenaces como el API 5L X65.

### 1.2.1 CTOD: Desplazamiento de la apertura de frente de grieta

Cuando A. Wells [3] realizaba ensayos de caracterización de aceros estructurales para determinar el parámetro de tenacidad de fractura  $K_{IC}$ , notó que los materiales presentaban grandes inconvenientes para su caracterización. Así que decidió estudiar la medida de la apertura del frente de grieta como una medida a la tenacidad de los materiales altamente tenaces. Asimismo, notó que las caras de las grietas se deformaban antes que la fractura ya que se producía un enromamiento (o pérdida de agudeza) del frente de grieta que incrementaba cuanto mayor era la tenacidad del material ensayado. La figura 1.3 muestra la diferencia entre el CTOD y la grieta enromada en una pieza agrietada.

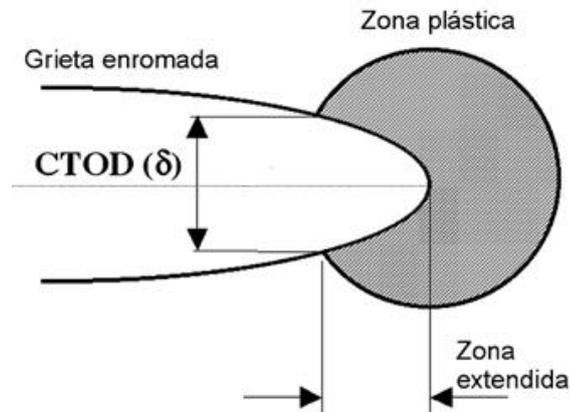


Figura 1.3: Grieta enromada y CTOD ( $\delta$ )

Wells hace uso del planteamiento tensional de la fractura como la corrección de Irwin [4] en la zona plástica y calcula el valor del parámetro *CTOD* y lo relaciona con la tasa de liberación de energía *G* en la siguiente ecuación (Ec.1):

$$\delta = CTOD = \frac{4}{\pi} * \frac{K_{IC}^2}{E \sigma_{ys}} = \frac{4}{\pi} * \frac{G}{\sigma_{ys}} \quad \text{Ec. 1}$$

La relación real entre *CTOD*,  $K_{IC}$  y *G* depende directamente del estado de tensiones y del endurecimiento por deformación. En su forma más general, desarrollada por Dugdale [5], la relación puede expresarse de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{K_{IC}^2}{m \sigma_{ys} E} = \frac{G}{m \sigma_{ys}} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde,

$K_{IC}$  es la constante de tenacidad a la fractura,

*m* es el factor geométrico representado por las dimensiones de las probetas,

$\sigma_{ys}$  es el esfuerzo de tracción,

*E* es el módulo de Young, y,

*G* es la tasa de liberación de energía

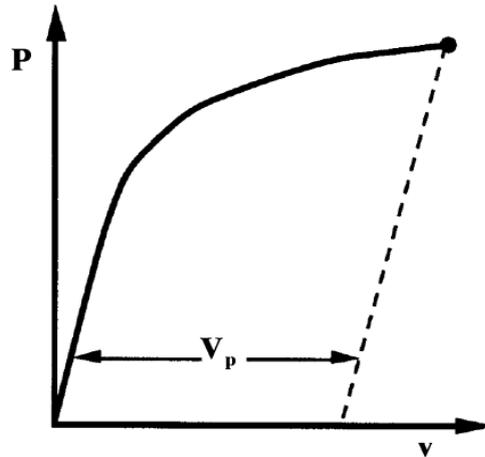


Figura 1.4: Gráfico esquemático de la curva carga vs desplazamiento en la boca de la grieta

En la figura 1.4<sup>3</sup>, se muestra la curva típica obtenida de un gráfico de carga vs desplazamiento muy parecida a la curva tensión-deformación; es lineal al inicio, pero se desvía como consecuencia de la deformación plástica y la línea de puntos representa la situación luego de detener la carga. El valor de *CTOD* está definido por las normas que se usen ASTM, ISO o BS; sin embargo, es común a todas estas que esté en función de su deformación elástica y plástica [6].

### 1.2.2 Integral *J*

La integral de contorno *J*, existe desde inicios del Siglo XX como parámetro de caracterización mecánica en el comportamiento de los materiales elásticos no lineales. Cuando se aplica a la Mecánica de la Fractura, representa la tasa liberación de energía, la cual, bajo un estado de tensión determinado, acompaña a la propagación de grieta de una fracción  $\delta a$ , aun cuando la plasticidad en el frente de grieta fuera apreciable.

El cálculo de *J* es distinto cuando se trata de medir un material con comportamiento no-lineal. El principio de superposición no puede aplicarse y no existe una solución que relacione el valor del parámetro *J*, con la carga y el tamaño de la grieta.

Una alternativa para la medición de *J* se plantea aplicando la definición de integral *J* en la ecuación general a través del alineamiento de galgas para la medida de la

<sup>3</sup> Obtenida del libro *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (2005) Pág. 107

deformación en un contorno alrededor del frente de grieta y seleccionando un contorno simple para simplificar el cálculo. Sin embargo, esta alternativa es muy tediosa al exigir la colocación de las galgas en el contorno, a partir de esto se plantea un contorno experimental más práctico.

Actualmente, la integral  $J$ , para una variedad de configuraciones se puede escribir como:

$$J = \frac{\eta U_c}{Bb} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

$\eta$  : Constante adimensional,

$U_c$  : es la energía absorbida en la rotura

$B$  : Espesor,

$b$  : Ligamento remanente,

La constante  $\eta$  suele estar en el entorno de 2 para grietas largas y, en caso se separe la ecuación 3 en sus componentes elástica y plástica<sup>4</sup>, se tiene:

$$J = \frac{\eta_{el} U_{c(el)}}{Bb} + \frac{\eta_p U_p}{Bb} = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{\eta_{el} U_{c(el)}}{Bb} \quad \text{Ec. 4}$$

### 1.2.3 Relación entre $J$ y CTOD

Desde que la microestructura de interés estuvo usualmente cerca de la superficie de la muestra de ensayo se creía importante extender el estudio de la fractura hasta las geometrías de la fisura [7]. El acercamiento geométrico al evaluar CTOD se encontró que era dependiente en la longitud de fisura para  $a/W < 0,45$  así como función de la dureza. En vez de mejorar el factor de relación para estos casos, se consideró mejor obtener CTOD a partir de la integral  $J$ , usando la relación basada en el CMOD (desplazamiento de la apertura de boca de grieta) y  $J$  la cual había demostrado ser insensible a la dureza y tenía un mejor acercamiento.

<sup>4</sup> Extraído del libro *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (2005) Pág. 117

En algunas normas [6] se considera CTOD como un cálculo de la ecuación 5, dependiente de la Integral J:

$$\delta = \frac{J}{m\sigma_y} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde  $m$  es una función del tamaño de fisura y propiedades del material [8].

$$m = A_0 - A_1 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right) + A_2 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^2 - A_3 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^3 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $A_0, A_1, A_2$  y  $A_3$  dependen de las dimensiones de la probeta.

### **1.3 Determinación experimental del valor de la tenacidad a Fractura**

Los ensayos de tenacidad a la fractura buscan medir la resistencia que tiene un material a extender la fisura. Los ensayos pueden ser tomados en diferentes probetas, o en una muestra única, y buscan reconocer un punto o graficar una curva que define  $K, J$  o  $CTOD$  versus la extensión de fisura.

Para la caracterización de cualquiera de los parámetros de tenacidad a la fractura, se trabaja cada una de las muestras bajo fatiga, además la carga a la que está sometida cada probeta varía de un estándar a otro. Solo se requiere instrumentación básica para la medición de la carga, sin embargo, se necesita instrumentación adicional para monitorear el crecimiento de la fisura.

#### **1.3.1 Orientación de la muestra**

Debido a que los materiales que se usan en diferentes aplicaciones de Ingeniería son en su minoría homogéneos e isotrópicos, el comportamiento de éstos variará significativamente de acuerdo a la dirección. Esta sensibilidad a la dirección es aún más notoria en ensayos de tenacidad a la fractura, es por eso que en algunos ensayos se prefiere la orientación cuyos planos de esfuerzo incrementen la facilidad de la propagación de fisura.

ASTM se enfoca bastante en la dirección de las muestras, es por esto que en su estándar ASTM E 1823 [9] se tienen diferentes notaciones para cada dirección en la que las probetas son retiradas. En el caso de tubo, ASTM E 1823 reconoce también

las secciones cilíndricas, y plantea la dirección longitudinal,  $L$ , dirección circunferencial,  $C$ , y dirección radial,  $R$ , para así reconocer fácilmente la orientación de la muestra.

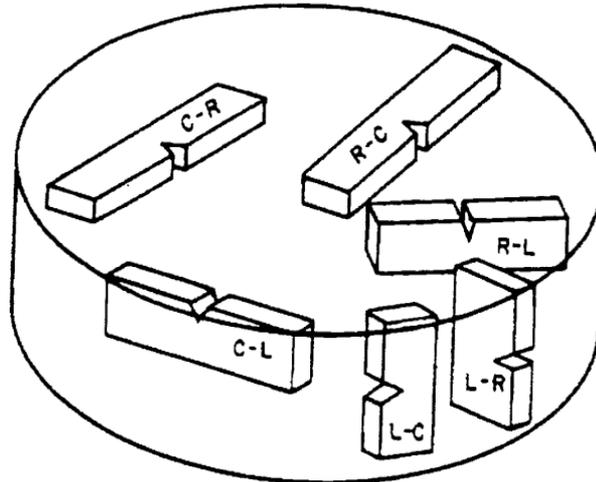


Figura 1.5: Denotación para la orientación para plano de fisura para barras y cilindros huecos<sup>5</sup>

### 1.3.2 Caracterización de $K_{IC}$

La caracterización de  $K_{IC}$  se definió para poder estudiar el comportamiento elástico lineal de un material hasta antes de su falla. Durante los años 60, se colaboró para establecer un método normalizado realizado por ASTM; el estándar ASTM E 399 [11], *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Metallic Materials*, originalmente publicado en 1970 (Brown y Srawley [10]). Durante los 70s, se postuló que las muestras pequeñas o secciones delgadas fallaban bajo condiciones de esfuerzo de plano, y que la deformación plana ocurre en las secciones gruesas. Sin embargo, a través de los años han ocurrido serios problemas con las asunciones de ASTM E 399 ya que se podía demostrar que los ensayos podían resultar en  $K_{IC}$  dependiente del tamaño de la muestra lo cual es lo opuesto a lo que la práctica sugiere.

Asimismo, para poder realizar los ensayos de  $K_{IC}$  y determinar las cargas máximas permisibles de fatiga, el usuario deberá especificar cargas de fatiga basadas en una tenacidad definida previamente del material. En caso se decida por cargas muy bajas,

<sup>5</sup> Imagen obtenida de ASTM E 1823 (2013)

la pre fisuración tomaría mucho tiempo. En cambio, si la pre fisuración es realizada con cargas muy alto, puede resultar en una grieta no válida para desarrollar el ensayo. Una vez que se tiene la muestra pre fisurada, se le cargará hasta la falla, y se monitorearán la carga y el desplazamiento.

Se pueden presentar tres tipos de curva carga-desplazamiento como se muestra en la Figura 1.6. En el caso del comportamiento Tipo I, la curva carga-desplazamiento será suave y se desvía ligeramente de la linealidad antes de llegar a la carga máxima  $P_{max}$ . Esta no linealidad se puede causar por plasticidad o crecimiento de grieta subcrítico. Para el Tipo II, una pequeña cantidad de grieta inestable (por ejemplo, un pop in) ocurre antes de que la curva se desvíe de su linealidad por 5%. Por último, para el Tipo III el comportamiento falla completamente antes de llegar el 5% de no linealidad; en esos casos  $P_Q = P_{max}$ .

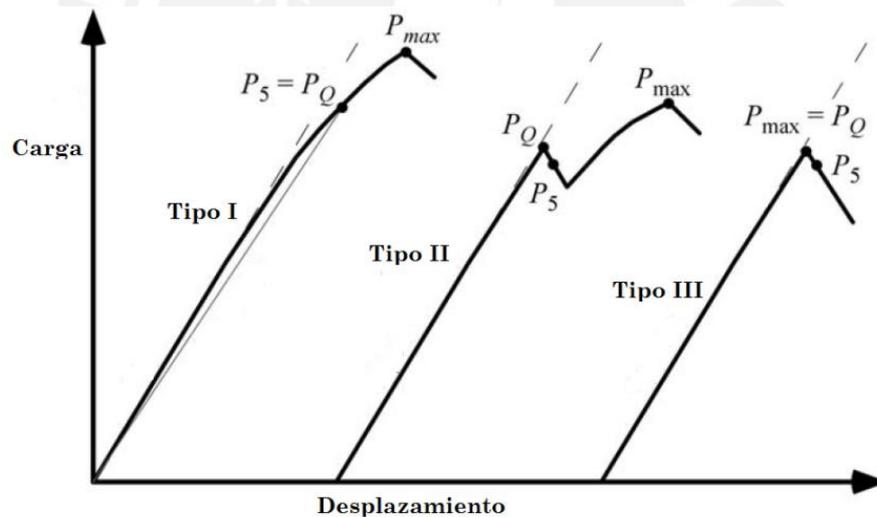


Figura 1.6: Tres tipos de comportamiento en curvas carga-desplazamiento en ensayo  $K_{IC}$

El problema con los ensayos de  $K_{IC}$ , es que usualmente se produce resultados inválidos sin importar la persona que realice los ensayos. Si la zona plástica en la fractura es muy larga, no es posible obtener un  $K_{IC}$  válido. Asimismo, las restricciones incluyen la carga de fatiga así como los límites de la curvatura de la grieta de fatiga. En caso todos estos requerimientos son alcanzados, recién  $K_Q = K_{IC}$ . Debido a esto, los procedimientos hechos para encontrar  $K_{IC}$  ya no se usan más.

### 1.3.3 Ensayos para la Curva $K_{IC} - R$

A través de la caracterización de  $K_{IC}$ , se puede hallar un valor único dentro de la Curva  $R$  o Curva de Resistencia; además de esto, el valor de la tenacidad aparente es dependiente del tamaño y define un  $K_Q$  dentro de la curva  $R$ . Es por esta razón que se empieza a usar el método de ensayos para determinar toda la curva  $R$  para aquellos materiales que muestran una extensión de grieta dúctil. Este método, estandarizado por ASTM E561 [12], muestra un procedimiento para determinar  $K$  versus las curvas de crecimiento de grieta en los materiales. A diferencia de los ensayos de caracterización de  $K_{IC}$ , este procedimiento no contiene un espesor mínimo para poder ser ensayado, y puede ser aplicado a láminas delgadas.

El método de ensayos plantea una curva predominante en un material elástico lineal. La curva  $R$  es inicialmente muy empinada, tanto como no ocurra crecimiento de grieta conforme aumenta  $K$ . Tan pronto inicia el crecimiento de grieta,  $K$  empieza a crecer hasta llegar a un estado de estabilidad donde la curva  $R$  se vuelve plana. Es posible definir una intensidad crítica de esfuerzo  $K_C$  donde la fuerza conductora es tangente a la curva  $R$ . Este punto de inestabilidad no es la propiedad de un material, sin embargo, debido a que el punto de tangencia depende de la forma de la curva de la fuerza conductora, la cual está gobernada por el tamaño y la geometría del cuerpo fisurado. Es por esta razón, que en caso se de este tipo de ensayos, los valores de  $K_C$  no pueden ser replicados ni transferibles a las estructuras.

#### 1.3.4 Caracterización de $J$

Existen métodos modernos para poder desarrollar el ensayo sobre la integral  $J$  como el estándar ASTM E 1820 o BS 7448: Part I, que busca generalizar la tenacidad a la fractura y cubrir  $K_{IC}$  así como CTOD.

Para la caracterización de  $J$  existen dos procedimientos. El primer procedimiento, con ensayos básicos y mediciones de  $J_{IC}$ , implica cargar la muestra a una fuerza  $P_m$  y obtener un valor único de la tenacidad a la fractura como  $J_{IC}$ ,  $K_{IC}$  o  $\delta_C$  sin la necesidad de usar un equipo de medición de extensión de grieta. El segundo procedimiento<sup>6</sup> está dirigido a una evaluación completa de la curva de resistencia de la tenacidad a la fractura usando equipo de medición de extensión de grieta.

---

<sup>6</sup> Los procedimientos se describen en 1.6.5 y 1.6.6

### 1.3.5 Tenacidad de fractura a partir del Ensayo Charpy

De acuerdo con la especificación *Fitness-For-Service* [13] de API 579<sup>7</sup>, los valores de la energía absorbida en un ensayo Charpy puede ser convertida directamente a  $K_{IC}$  usando las correlaciones  $K_{IC} - CVN$ . En este caso, los valores pueden ser extrapolados o pueden obtenerse directamente de una curva de transición de temperaturas. Las diferentes correlaciones están numeradas a continuación:

a)  $K_{IC} - CVN$ : Correlaciones de zona superior

1) Correlación Rollfe-Novak-Barsom para  $K_{IC}$

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.64 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.01\right) \quad \text{Ec. 7}$$

2) Estimado mínimo recomendado por WRC 265

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}}\right)^2 = 0.52 \left(\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.02\right) \quad \text{Ec. 8}$$

b)  $K_{IC} - CVN$ : Correlaciones de zona inferior

1) Correlación Sailors y Corton para tenacidad a la fractura estática

$$K_{IC} = 14.6(CVN)^{0.50} \quad \text{Ec. 9}$$

2) Estimado para la tenacidad a la fractura estática recomendado por WRC 265.

$$K_{IC} = 8.47(CVN)^{0.63} \quad \text{Ec. 10}$$

### 1.3.6 Normas para Medición de Tenacidad a la Fractura

Existen diferentes normas para la Medición de la tenacidad a la Fractura, entre las más conocidas tenemos a las de la siguiente tabla (Tabla 1.1):

<sup>7</sup> API 579. Apéndice F: F.4.5.2

Tabla 1.1: Estándares más conocidos para Medición de Tenacidad a la Fractura

Estándar Internacional	
BS-7448-1 :Part I	Estándar Británico. Ensayos de Tenacidad a la fractura. Métodos para la determinación de $K_{IC}$ , CTOD Crítico y J crítico para materiales metálicos
ISO 12135	Método unificado de ensayos para la determinación de la tenacidad de fractura cuasi estática
ASTM E1820	Método Estándar para la Medición de la tenacidad a la fractura

La norma ISO 12135 y la norma ASTM E 1820 son normas más generales, de las cuales sus principales diferencias yacen en la calificación de las curvas J-R medidas de acuerdo a sus criterios de validez.

Respecto a la norma BS 7448 y ASTM E 1820, *The Welding Institute*, [6], menciona que entre las principales diferencias entre ambas normas, la mayor diferencia se nota en las ecuaciones que se usan para calcular CTOD. BS 7448 asume la muestra que rota sobre un punto fijo en un ligamento no agrietado, mientras que ASTM E 1820 deriva CTOD de la integral J. Asimismo, el estándar ASTM E 1820 cubre una mayor cantidad de geometrías de muestras que el estándar BS 7448.

Se selecciona el estándar ASTM E 1820 para trabajar, principalmente por los cálculos sobre CTOD diferentes de BS 7448. Asimismo, el mayor uso comercial de la norma ASTM E 1820 ayuda a que los resultados de la evaluación sean comprobables con diferentes estudios realizados sobre este material y procedimiento.

#### 1.4 Aplicaciones en ingeniería

El conocimiento de las propiedades de tenacidad a la Fractura y sus parámetros representativos ( $K_C$  o  $K_{IC}$ ), ayuda al ingeniero a realizar un diseño para prevenir la fractura, no solo durante la selección de materiales sino también a través del planteamiento de tamaños de grieta críticos para el control de calidad.

### 1.4.1 Diseño y Selección de materiales

Para las estructuras más grandes y complejas, es necesario que los elementos toleren grandes defectos sin que se produzca la fractura. Por esta razón se toma como índice para medir la tenacidad a fractura relativa de los materiales estructurales el valor de  $(K_{IC}/\sigma_{ys})^2$  o  $(K_C/\sigma_{ys})^2$  los cuáles deben ser proporcionales al tamaño crítico de grieta,  $a$ . No existe un valor del ratio  $K_{IC}/\sigma_{ys}$  que pueda definir el comportamiento satisfactorio en las estructuras complejas. Sin embargo, la Mecánica de Fractura proporciona una herramienta de ingeniería para apoyar en la respuesta, esto es, el uso de la relación  $K_{IC}/\sigma_{ys}$  para los materiales usados en una estructura particular, como uno de los primeros parámetros de diseño que pueden usarse para definir la seguridad relativa de una estructura contra la fractura.

### 1.4.2 Diseño frente a la fractura

Para el diseño frente a la fractura, existe una ecuación (Ec. 11) que busca relacionar el tamaño de grieta con determinada carga:

$$K_{IC} = m\sigma\sqrt{a} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,

$K_{IC}$  = propiedad característica del material en tenacidad a fractura, definido por un ensayo realizado a una temperatura determinada

$m$  = coeficiente geométrico dependiente del elemento a analizar

$\sigma$  = tensión nominal aplicada, *MPa*

$a$  = tamaño del semidefecto o profundidad del defecto

De esto, se puede definir el máximo defecto tolerable en un determinado componente estructural,

$$a_c = \left[ \frac{K_{IC}}{M * \sigma} \right]^2 \quad \text{Ec. 12}$$

De allí, se puede ver que para minimizar la posibilidad de fractura frágil en una estructura, se deben seguir tres factores básicos graficados en la figura 1.7:

- El tipo de material, incluyendo un determinado valor de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$ ,  $MPa\sqrt{m}$
- Tensión nominal alcanzada,  $\sigma$ ,  $MPa$
- Tamaño de la grieta presente en la estructura  $a$ ,  $m$

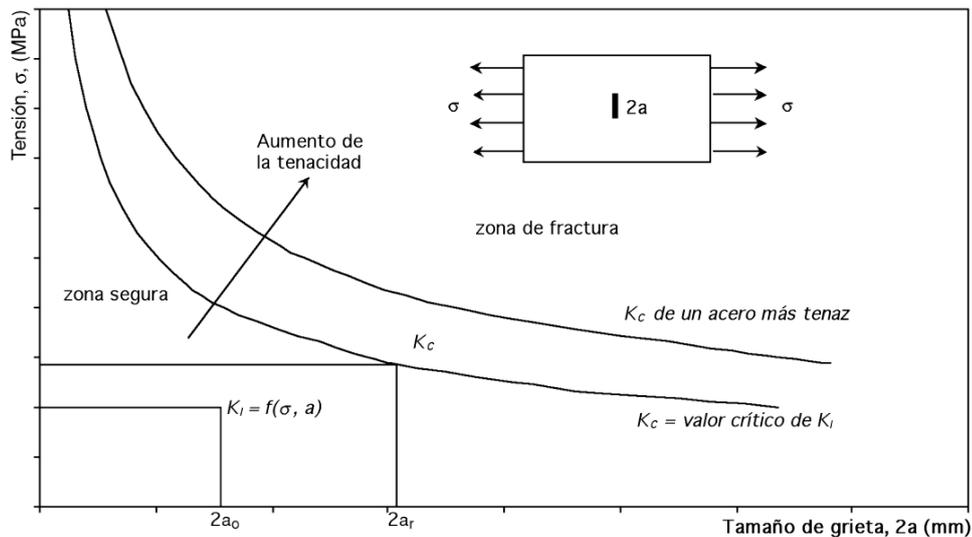


Figura 1.7: Análisis de la relación entre tamaño de grieta, tenacidad del material y tensión

### 1.5 Propiedades de la Muestra Según API 5L X65 PSL2

Las tuberías API 5L [14], especiales para transporte de hidrocarburos, son fabricadas de acero de baja aleación y están desarrolladas para las aplicaciones donde las propiedades mecánicas y la composición química son necesarias para cumplir con esfuerzos muy altos y sometidos a altas presiones.

Las tuberías API 5L presentan dos diferentes niveles de especificación de producto (*Product Specification Level, PSL*), PSL1 y PSL2. El nivel PSL1 provee un nivel de calidad estándar para tuberías y el nivel PSL2 tiene requerimientos adicionales para la composición química y propiedades mecánicas adicionales.

Existen diferentes grados para ambos niveles de tuberías, sin embargo, debido a la muestra obtenida se trabajará con API 5L Grado X65 con un nivel de especificación PSL 2.

La aplicación de API 5L de tal grado, como es el X65, el cual consiste en Aceros Microaleados, *High-Strength Low Alloy Steel (HSLA)*, es presentado como una solución potencial para incrementar la confiabilidad en la operación de estas tuberías en ambiente hostiles.

### 1.5.1 Proceso de fabricación

Los aceros HSLA, donde el contenido de carbón está cerca al 0.06 % en peso, han tenido un desempeño relacionado a los aceros regulares C-Mn, debido a la mejor combinación de resistencia mecánica y tenacidad. La combinación dada por una adición de elementos microaleantes como Mo, Ti, V, Ni y Nb; y además debido a los tratamientos termo mecánicos.

Estos aceros pueden ser rolados por TMCR, Rolado Termomecánico Controlado. El TMCR consiste en placas de laminación<sup>8</sup> mayormente desarrollada en 3 pasos. Primero, rolado en temperaturas de recristalización de austenita (sobre 1250 °C); segundo, rolado en temperaturas de no-recristalización de austenita (sobre 1050 °C); y tercero, finalizar el rolado en la temperatura de austenita-ferrita (o aun en temperaturas más bajas dependiendo del contenido del carbón y en la resistencia mecánica conseguida) y finalmente enfriado por aire. Sin embargo, hay una diferencia fundamental entre ambos TCMR y TMCP, la temperatura de paso del rolado final. En el proceso TMCR, la temperatura es menor porque como este proceso no tiene enfriamiento acelerado, las propiedades mecánicas deberían ser garantizadas durante el paso final de rolado. Reducir la temperatura en este tercer paso del proceso TMCR da la microestructura necesaria en el acero. Estas texturas tienen orientaciones diferentes a través de los espesores de plancha, los cuales causan el desarrollo de esfuerzos residuales en el material rolado lo que permite la aparición de separaciones. También se conoce que a través de las referencias técnicas que las separaciones sufren la influencia no solo de la temperatura de rolado, sino también de la composición química, esfuerzo y cantidad de inclusiones no metálicas [15].

### 1.5.2 Propiedades Químicas

---

<sup>8</sup> *Rolling slabs*

Según API 5L<sup>9</sup>, para tuberías con espesor menor a 25.0 mm (0.984”), la composición química para grados estándar así como los grados intermedios deberán ser consistentes con la Tabla 2.

Para tuberías con nivel PSL2, como es el caso de la muestra, y con un análisis de porcentaje en masa de carbón menor a 0.12%, el porcentaje de carbono equivalente,  $CE_{Pcm}$ , será determinado usando la siguiente ecuación (Ec.13):

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \text{Ec. 13}$$

Donde los símbolos para los elementos químicos representan la fracción de masa en porcentaje (ver Tabla 1.2). Si el análisis del Boro es menor a 0.0005%, entonces no es necesario que el análisis del producto incluya Boro, y el contenido de Boro será considerado cero para el cálculo de  $CE_{Pcm}$ .

En caso el análisis de porcentaje en masa de carbón sea mayor a 0.12 %, el carbono equivalente  $CE_{IIW}$ , será determinado usando la siguiente ecuación (Ec. 14),

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde los símbolos para los elementos químicos representan la fracción en masa en porcentaje (ver Tabla 1.2).

**Tabla 1.2:** Composición Química para tubería PSL 2

Procedimiento de Fabricación		Tubería soldada
Grado de la tubería		LQ450M o X65M
<b>Fración en masa, %</b> , basado en análisis del producto	C	0,12
	Si	0,45
	Mn	1,60
	P	0,025
	S	0,015
	V	a
	Nb	a

<sup>9</sup> API 5L, *Specification for Pipe Line*, 9.2 Chemical Composition.

	Ti	a
	Otros	b,c
Carbono equivalente	$CE_{IIW}$	0,43
% máximo	$CE_{Pcm}$	0,25
a	A menos que se haya acordado otra cosa, $Nb + V + Ti \leq 0,15$ %	
b	A menos que se haya acordado otra cosa, $Cu \leq 0,50$ %; $Ni \leq 0,50$ %; $Cr \leq 0,50$ % y $Mo \leq 0,50$ %.	
c	Para todos los grados de tubería PSL 2, sin embargo cualquier otra adición no intencional de B es permitida y considerada residual si $B \leq 0,001$ %.	

### 1.5.3 Propiedades Mecánicas

De acuerdo al estándar API 5L, las tuberías de nivel PSL 2, tienen las siguientes propiedades mecánicas para Grado X65 (o L485), se tiene:

**Tabla 1.3:** Propiedades mecánicas de API 5L X65

Cuerpo de tuberías sin cosido y cosidas					
Grado de Tubería	Esfuerzo de Fluencia $\sigma_{ys}$		Esfuerzo de tracción $\sigma_{TS}$		Ratio $\sigma_{ys} / \sigma_{TS}$ Máximo
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	
L450Q o X65Q	450	600	535	760	0,93
L450M o X65M	(65300)	(87000)	(77600)	(110 200)	

### 1.5.4 Ensayo de Impacto Charpy CVN para Tubería PSL 2

Por el estándar API 5L<sup>10</sup>, los valores individuales de cada probeta ensayada por impacto Charpy deberán ser por lo menos el 75% del promedio mínimo requerido de valor de energía absorbida (de un juego de 3 muestras). Asimismo, los ensayos realizados a temperaturas menores a las específicas deberán ser aceptables si los requerimientos de absorción de energía son alcanzados también a bajas temperaturas.

<sup>10</sup> API 5L, *Specification for Pipe Line*, 9.8 CVN impact test for PSL 2 Pipe, Diciembre 2012

La tabla 1.4 muestra el mínimo de energía absorbida necesaria para el grado de tubería X65 en el diámetro de la muestra.

**Tabla 1.4:** Energía absorbida por ensayo CVN para Grado X65<sup>11</sup>

Diámetro Específico Exterior mm (in)	Energía absorbida CVN para probeta estándar mínimo Kv J (ft-lbf)		
	> X60 hasta ≤ X65	> X65 hasta ≤ X65	> X65 hasta ≤ X80
	≤ 508 (20.000)	27 (20)	27 (20)
> 508 (20.000) hasta 762 (30.000)	27 (20)	27 (20)	40 (30)
> 762 (30.000) to 914 (36.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 914 (36.000) hasta 1 219 (48.000)	40 (30)	40 (30)	40 (30)
> 1 219 (48.000) hasta 1 422 (56.000)	54 (40)	54 (40)	54 (40)
> 1 422 (56.000) hasta 2 134 (84.000)	54 (40)	68 (50)	68 (50)

### 1.5.5 Dimensiones, masa y tolerancias

De acuerdo a API 5L, la siguiente tabla, Tabla 1.5, muestra las dimensiones permisibles para espesor de pared así como diámetro exterior de tubería.

**Tabla 1.5:** Rango de diámetro exterior y espesores permisibles por API 5L

Diámetro exterior D mm (in)	Espesor de pared t mm (in)
-----------------------------------	----------------------------------

<sup>11</sup> Tabla extraída de Especificación API 5L – 2012. *Acceptance Criteria – CVN impact test for PSL2 Pipe*

	Tamaño ligero especial	Tamaño regular
> 711 (28.000) a 864 (34.000)	$\geq 5,6$ (0.219) a 7,1 (0,281)	> 7,1 (0.281) a 52,0 (2.050)

## 1.6 Estándar para Medición de Tenacidad a la Fractura : ASTM E 1820

### 1.6.1 Conceptos Generales

El estándar E 1820 [16] está planteado para cubrir los procedimientos y lineamientos para la determinación de la tenacidad a la fractura de los materiales metálicos usando los parámetros,  $K$ ,  $J$  y  $CTOD$ . La tenacidad puede ser medida por el formato de curva R o como un valor único.

Asumiendo la presencia de una muesca aguda pre existente ocasionada por fatiga; los valores identificados en este estándar caracterizan su resistencia a la fractura de una grieta estacionaria, la fractura después de una rotura estable, rotura estable inicial y rotura estable sostenida. Se apoya de la terminología planteada en la norma ASTM E 1823, y busca plantear un método combinado de los métodos E 399, E 1290 y E1921. Este método está basado en dos procedimientos diferentes, el procedimiento básico y el procedimiento de la curva de resistencia. El objetivo está en cargar una probeta pre fisurada por fatiga para inducir alguna de las siguientes respuestas: extensión de fisura inestable o extensión estable de fisura. La extensión inestable resulta en un valor único de tenacidad determinado en una curva R, mientras que la rotura estable interrumpida por fractura resulta en una curva R con un punto de inestabilidad. Estos valores obtenidos para la tenacidad a la fractura sirven como una base para la comparación del material, selección y aseguramiento de calidad. Asimismo, se puede usar para obtener un ranking de materiales con un rango de tenacidad parecido.

### 1.6.2 Configuración de la muestra

De acuerdo a la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM), en su estándar ASTM E1823 [9], hay cinco tipos de muestras permitidas para caracterizar la iniciación de fractura así como el crecimiento de grieta. Las configuraciones incluyen, muestra compacta, muestra de doblado con ranura simple, muestra arqueada, la

muestra de disco y la muestra de media tensión. La siguiente figura, Figura 5, describe los diferentes tipos.

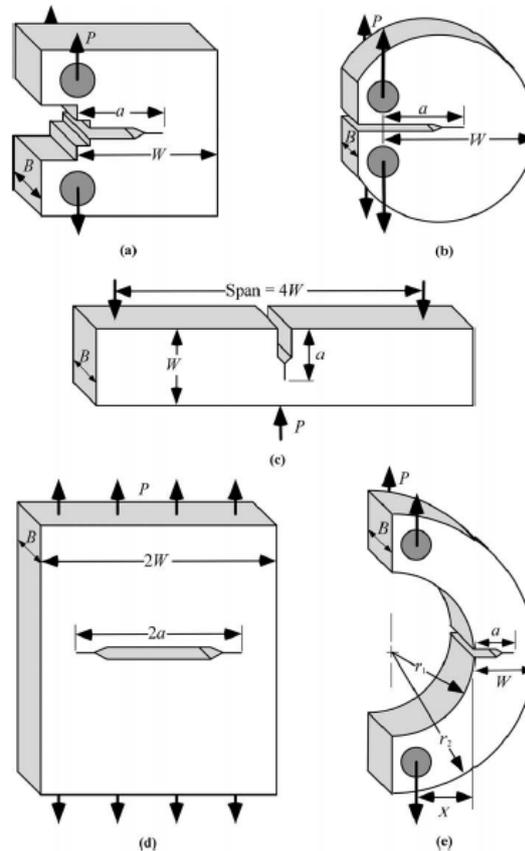


Figura 1.8: Configuraciones de probeta para ensayos de tenacidad a la fractura: (a) Muestra compacta (b) muestra compacta con forma de disco (c) probeta de doblado con ranura simple, (d) muestra de media tensión y (e) muestra arqueada.<sup>12</sup>

Asimismo, existen otras configuraciones para la medición cualitativa de la tenacidad, como el ensayo Charpy<sup>13</sup> o los ensayos de caída libre. Cada configuración de probeta tiene tres dimensiones características importantes: la longitud de grieta ( $a$ ), el espesor ( $B$ ) y ancho ( $W$ ). En la mayoría de casos,  $W = 2B$  y  $a/W = 0.5$ , sin embargo, existen algunas excepciones.

### 1.6.3 Preparación de Probeta

<sup>12</sup> Obtenido de *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (2005) pág. 300

<sup>13</sup> Revisar 1.3.5 : Tenacidad de fractura a partir del Ensayo Charpy

El estándar E 1820 permite tres tipos de probetas para la determinación de los valores de tenacidad: la muestra compacta (CT), la muestra de doblado con ranura simple (SENB) y la muestra compacta con forma de disco (DCT).

La probeta de doblado con ranura simple (SENB) y la muestra compacta con forma de disco (DCT) son similares a las mostradas en la Figura 1.8; sin embargo, la muestra compacta, de acuerdo con el estándar E 1820, plantea 3 opciones con arreglos diferentes mostrados en la Figura 1.9.

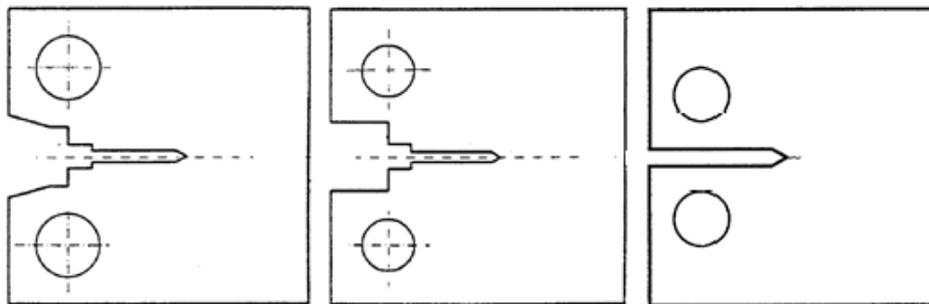


Figura 1.9: Modelos de probeta Compacta según ASTM E 1820 (a), (b) y (c) respectivamente de izquierda a derecha

#### 1.6.4 Pre fisuración de la Muestra

Para poder continuar la determinación de la tenacidad a la fractura es necesario obtener una primera fisura, o pre fisura, obtenida por fatiga cíclica a la probeta. La probeta es fisurada para buscar simular el inicio de una grieta en un área de laboratorio [17].

El método de pre fisuración en las muestras comunes se da a través de cargar una muesca maquinada en la probeta con cargas cíclicas sinusoidales (Figura 1.10). Esta carga cíclica se puede dar a través de una máquina de ensayos funcionando con un servomotor programado o a través de máquina especializada para pre fisurar por fatiga.

Para que la carga cíclica produzca una grieta de radio finito que pueda reflejar las propiedades del material, la grieta por fatiga deberá satisfacer las siguientes condiciones:

- El radio de la muesca para agrietar durante la falla deberá ser mucho mayor que el radio inicial de la grieta por fatiga.
- La zona plástica producida durante la pre fisuración por fatiga deberá ser pequeña en comparación con la zona plástica en la fractura.

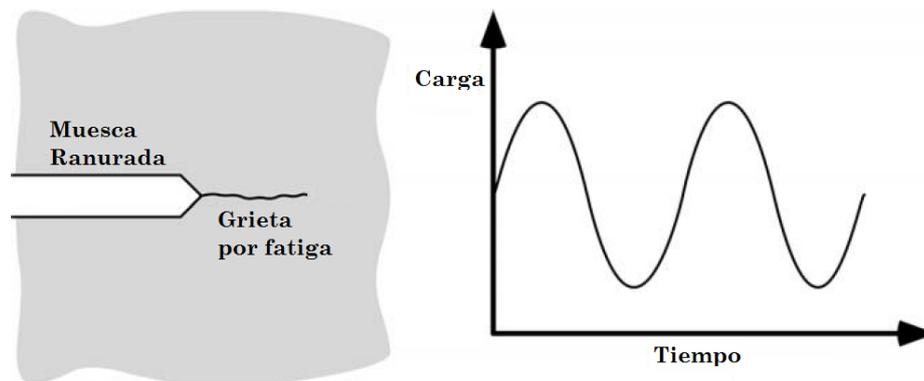


Figura 1.10: Pre fisuración por fatiga de una muestra de Mecánica a la fractura sometida a cargas cíclicas.

De acuerdo con la norma ASTM E1820<sup>14</sup>, la pre fisura por fatiga deberá producirse al cargar cíclicamente la muestra con ranura por un número de ciclos de carga entre  $10^4$  y  $10^6$  dependiendo del tamaño del espécimen, la preparación de la ranura y el nivel de intensidad de esfuerzo. Para poder calcular la fuerza pico de compresión  $P_m$  no deberá exceder lo planteado en la ecuación 15, de acuerdo con el tipo de probeta, *Probeta compacta*.

$$P_m = \frac{0.4Bb_o^2\sigma_y}{2W + a_o} \quad \text{Ec. 15}$$

Asimismo, el tamaño de la grieta por fatiga deberá estar entre 0.45 y 0.55  $W$  para la determinación de  $J$ ,  $\delta$  y  $K_{IC}$ . La longitud de la extensión de pre fisura por fatiga de la ranura maquinada no deberá ser menor a 0.05  $B$  y no menor a 1.3 mm (0.05 in.) para la ranura completa.

Alineado a ASTM E 1820, la pre fisuración se debe dar en, al menos, dos pasos. Para el primer paso, el factor de intensidad de esfuerzo máximo aplicado a la muestra deberá estar limitado por el concentrador de esfuerzos  $K_{MAX}$  :

$$K_{MAX} = \left( \frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}^T} \right) (0.063\sigma_{YS}^f \text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad \text{Ec. 16}$$

Donde,

<sup>14</sup> 7.4 Specimen Precracking. ASTM E 1820

$\sigma_{YS}^f$  y  $\sigma_{YS}^T$  son los esfuerzos de fluencia del material en la pre fisura por fatiga y a la temperatura de ensayo respectivamente.

Es usualmente más efectivo usar  $R = P_{MIN}/P_{MAX} = 0.1$ . La pre fisuración deberá llevarse tan bajo como sea practico el  $K_{MAX}$ . Se sugiere que el usuario inicie con aproximadamente  $0.7K_{MAX}$ , y si la pre fisuración no inicia después de  $10^5$  ciclos, la carga se puede ir incrementado hasta que la fisura empieza a extenderse.

Para el segundo paso de pre fisura, que deberá incluir al menos el 50% de la grieta por fatiga o 1.3 mm, el factor de intensidad de esfuerzo que será aplicado estará dado por:

$$K_{MAX} = 0.6 \frac{\sigma_{YS}^f}{\sigma_{YS}^T} K_F \quad \text{Ec. 17}$$

Donde,  $K_Q, K_{JQ}, K_{JQC}$  dependiendo del resultado del ensayo, y  $K_F$  se calcula del  $J_F$  usando la siguiente relación:

$$K_F = \sqrt{\frac{EJ_F}{(1 - \nu^2)}} \quad \text{Ec. 18}$$

### 1.6.5 Procedimiento básico de rotura

El procedimiento básico involucra una probeta cargada en un nivel de desplazamiento seleccionado y se determina la extensión de fisura que ocurre durante la carga. Se carga la probeta con una frecuencia de carga constante y creciente hasta llegar al valor  $P_m$ , determinado para cada tipo de probeta, se encuentre entre 0,3 y 3 minutos.

Si el ensayo termina en inestabilidad de fractura, se mide el tamaño inicial de grieta y cualquier extensión de fisura. Se debe definir la extensión dúctil de fisura y se le diferencia de la región frágil. En caso ocurra rotura estable, se deberá evaluar más probetas para determinar el valor de iniciación y se usará un método óptico de medición de tamaño de fisura para determinar una curva R necesaria para evaluar el comportamiento del material.

### 1.6.6 Procedimiento de Curva de Resistencia

El procedimiento de la curva de resistencia involucra usar una técnica de corrección elástica u otra técnica para obtener  $J$  o la curva de resistencia  $CTOD$  a partir del

ensayo en una sola probeta. Se carga la probeta, con las galgas extensométricas conectadas, hasta llegar a  $P_m$ , determinado para cada tipo de probeta, durante un tiempo de 0,3 y 3 minutos. El tiempo para realizar la secuencia de descarga/recarga deberá ser el necesario para estimar el tamaño de fisura con exactitud, pero no más de 10 minutos.

Se deberá tomar cada una de las probetas bajo los siguientes pasos:

- 1) Medir la separación para estimar el tamaño original de grieta,  $a_o$ , usando secuencias de descarga/recarga en un rango de fuerza de 0,5 a 1 veces la fuerza máxima de pre fisura. Estimar el tamaño inicial provisional,  $a_{oq}$ , de al menos 3 secuencias de descarga/recarga. Ningún valor individual debe diferir del promedio por más de  $\pm 0,002W$ .
- 2) Proceder con el ensayo usando secuencias de descarga/recarga que produzcan mediciones de extensión de grieta en intervalos prescrito por los diferentes análisis de información. Notar que al menos 8 puntos deberán estar requeridos antes que la probeta llegue a la fuerza máxima. Si se espera que suceda inestabilidad de fractura, puede ayudar el cargar la probeta en el rango  $P_m < P < P_Q$ . Si los valores de las grietas cambian negativamente en más de  $0,005a_o$ , detener el ensayo y revisar la alineación.
- 3) Al finalizar con el último ciclo de descarga, regresar la fuerza a cero y usar un método óptico de determinación de tamaño de fisura.

### 1.6.7 Medición Óptica del Tamaño de grieta

Al terminar la última descarga de la probeta, se marca la grieta de acuerdo a *heat tinting* a 300°C (570 °F) aproximadamente por 30 minutos. No se recomienda el uso de líquidos penetrantes. El inicio de la extensión de grieta estable está marcado por el final de área pre fisurada por fatiga. El final de la extensión de grieta se marca por el final del *heat tint*.

Se rompe el espécimen para exponer la grieta con el cuidado debido para minimizar alguna deformación adicional. Enfriar las probetas puede ayudar a minimizar la deformación durante la rotura final.

Se mide el tamaño de la grieta original y el tamaño de la grieta final físico en 9 puntos equidistantes centrados sobre la línea de centro de la probeta y extendiéndose en  $0.005W$  de la superficie doblada de la probeta. Se calcula el tamaño original de grieta,  $A$  través de la grieta por fatiga y el frente de la región marcada de la extensión,  $a_o$ , y el tamaño físico final de la grieta,  $a_p$ , como sigue: el promedio de dos mediciones cercanas a la superficie, combinar los resultados con los resultantes de las otras 7 mediciones y determinar el promedio. Se calcula la extensión de grieta física con  $\Delta a_o = a_o - a_p$ . El instrumento de medición deberá tener una precisión de 0.025 mm (0.001”).

Asimismo, ninguna de las 9 mediciones realizadas del tamaño original de grieta y el tamaño final físico deberán diferir por más de  $0.05B$  del promedio de grieta definido grieta definido por las anteriores 9 mediciones.

### 1.6.8 Análisis de Resultados

Para que todos los datos califiquen, de acuerdo a ASTM E 1820, es necesario que se cumplan los requerimientos de equipamiento, tolerancia, alineación de accesorios, frecuencia de ensayo, estabilidad de temperatura y exactitud que se plantean en la sección 6, 7 y 8 del estándar E 1820.

Cuando el ensayo termina con inestabilidad de fractura, se evalúa la ocurrencia de la fractura antes de la rotura estable o después de la rotura estable, y de acuerdo a ello se realizan diferentes cálculos planteados en la misma norma. En caso el ensayo termine en rotura estable, se usa el procedimiento básico y solo la tenacidad inicial puede ser evaluada, se siguen los cálculos planteados para este caso.

## CAPITULO II

### 2. METODOLOGIA Y EXPERIMENTACION

#### 2.1 Caracterización de la Muestra

##### 2.1.1 Dimensiones de la muestra

Las dimensiones de la muestra obtenida deberán cumplir con los requerimientos admisibles por la norma API 5L, en la tabla 1.5.



**Figura 2.1:** Foto de la muestra en Laboratorio de Materiales PUCP

##### 2.1.2 Análisis Químico

Para obtener la composición de la muestra, es necesario realizar un análisis químico de la muestra y así conocer la composición de los diferentes elementos y comparar los resultados con la tabla de datos provistos por la norma API 5L en la Tabla 1.2. Se mecaniza una pequeña muestra (1" x 1") y es analizada mediante espectrometría de emisión según la norma ASTM E 415-08 [18].

### 2.1.3 Ensayo de Tracción

Las características mecánicas se definen por el ensayo de tracción. Para estos ensayos, se ha considerado dos probetas, longitudinal y transversal, tomadas a 90° de la unión soldada de la muestra basadas en la norma ASTM A 370 [19]. A partir de los resultados, se calcula el módulo de Young con la norma ASTM E 111 [20].

$$E = \left(\frac{\Delta P}{A_o}\right) / \left(\frac{\Delta_c}{L_o}\right)$$

Ec. 19

Dónde,

$\Delta P$  es el incremento de fuerza

$A_o$  es el área de la sección transversal original

$\Delta_c$  es el extensión longitudinal

$L_o$  es la longitud original de las galgas (50 mm)



Figura 2.2: Probetas de Tracción

### 2.1.4 Ensayo de Impacto Charpy

Se realizan ensayos de Impacto Charpy en la Máquina Zwick/Roell RKP 450 según ASTM A370. Estos ensayos se realizan para determinar la energía absorbida a la temperatura a la que se realiza el ensayo de tenacidad a la fractura y, a través de correlaciones planteadas en el estándar API 579 que se encuentran en el punto 1.3.5 de la presente tesis, encontrar el valor de tenacidad a la fractura para posteriormente comparar ambos resultados.

### 2.1.5 Ensayo de metalografía

Como parte de la validación de la muestra, se realiza el ensayo de metalografía de acuerdo a ASTM E 112 [21]. El objetivo de este ensayo es medir el tamaño de grano en una muestra longitudinal y estudiar su microestructura.

## 2.2 Determinación experimental de la Tenacidad a la Fractura

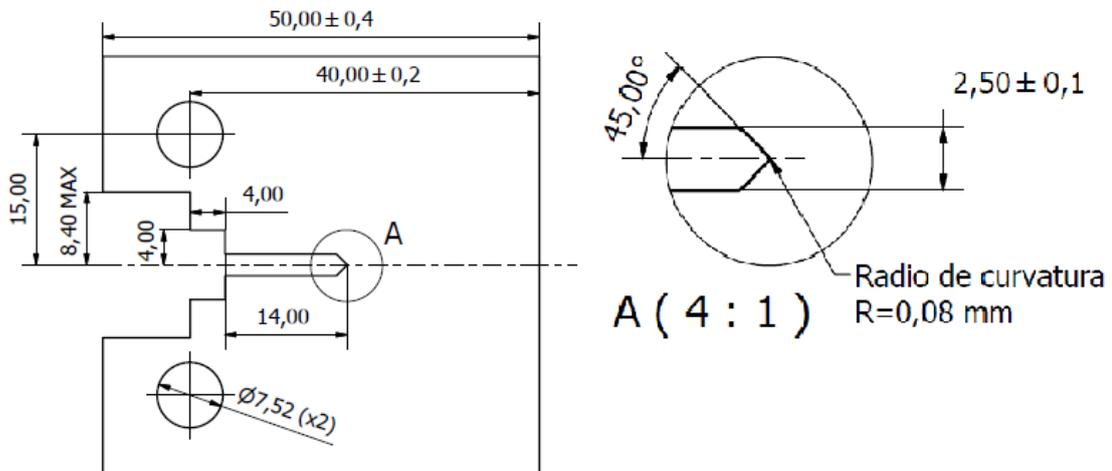
### 2.2.1 Preparación de Probeta

A partir del estándar ASTM E 1820, se selecciona la probeta compacta, retirada de la posición L-C<sup>15</sup> de la muestra de Laboratorio, debido a que la norma plantea 3 alternativas se selecciona la alternativa cuyo uso se ha dado de manera más confiable para la medición de  $J^{16}$ , la probeta tipo (b) de la figura 1.9.

Las dimensiones finales de la probeta son definidas por el Anexo 2 del estándar ASTM E 1820, se muestran estas dimensiones finales en la figura 2.3. Considerando la preparación de la muestra CTOD se realiza en dos etapas, la primera etapa es el mecanizado de las dimensiones superficiales al Laboratorio de Manufactura (Figura 2.4), y la segunda etapa, a cargo de una empresa externa (Figura 2.5), encargada de la electroerosión y maquinado de la muesca.

---

<sup>15</sup> Revisar 1.3.2 Orientación de la muestra.



**Figura 2.3:** Dimensiones de la probeta CTOD de acuerdo con ASTM E 1820



**Figura 2.4:** Primera etapa, Mecanizado en el Lab de Manufactura – PUCP

Es importante reconocer que una de las características más importantes de la probeta es la entalla de dimensiones tan finas que debe tener, esto se debe a que durante el ensayo se necesita modelar la grieta de la manera más exacta y esta ranura promueve el agrietamiento en su punta.



**Figura 2.5:** Segunda etapa, electroerosión de Muesca

Al realizar la probeta CTOD es importante no solo revisar la geometría de esta sino también la clase de equipamiento que va a tener, debido a esto se erosionan unas muescas pequeñas cerca a la ranura para colocar las galgas extensométricas y determinar la apertura de la boca de grieta.

### 2.2.2 Pre fisuración de muestra

Se procede a colocar la muestra dentro de la máquina Vibróforo Zwick/Roell RKP 450 para su pre fisuración. Para el software, TestXpert II, que comanda el Vibróforo RKP 450, los valores ingresados, basados en las ecuaciones 15, 16 y 17, así como en la geometría de la probeta y propiedades del material, se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Datos de entrada al Software TestXpert II para pre fisuración

Información	Und.	Ensayo	Ensayo	Ensayo	Ensayo	Ensayo
-------------	------	--------	--------	--------	--------	--------

		1	2	3	4	5
Longitud inicial de grieta	mm	18	18	18	18	18
Kmax en la long. inicial de grieta	MPa $\sqrt{m}$	44	44	40	47	49
Máx. Longitud de grieta	mm	21	21	21	23	25
Kmax (al final del ensayo)	MPa $\sqrt{m}$	40	40	36	43	45
Selección de entrada		R-ratio	R-ratio	R-ratio	R-ratio	R-ratio
Ratio R (al final del ensayo)		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
a2	mm	-	-	-	-	-
Espesor	mm	20	20	20	20	20
Distancia $W$ , ancho	mm	40	40	40	40	40
Distancia $x$	mm	12	12	12	12	12
Módulo de Young	GPa	210.4	210.4	210.4	210.4	210.4

Además, para que la grieta ocasionada por pre fisura cumpla con los requisitos de la norma ASTM E 1820, ésta deberá cumplir con estar entre  $0.45W$  y  $0.7W$  para la determinación de  $J$  y  $\delta$ ; y de  $0.45W$  a  $0.55W$  para la determinación de  $K_{IC}$ .

### 2.2.3 Ensayo de Rotura

El ensayo de rotura se basa en el procedimiento de determinación de curva de Resistencia que se realizará en la máquina de Ensayos Zwick/Roell Z250, sobre la cual se ensaya una sola probeta para poder obtener el valor único de  $J$  o la curva de resistencia. Asimismo, este tipo de ensayos requiere una técnica elástica de corrección como una técnica de normalización dependiente de la compliancia del material, cuyo cálculo está especificado por el estándar ASTM E 1820.

Para poder calcular  $J$  para la probeta compacta se sigue la siguiente fórmula:

$$J = J_{el} + J_{pl}$$

Ec. 20

Donde,

$J_{el}$  es el componente elástico de  $J$

$J_{pl}$  es el componente plástico de  $J$ .

Debido a que existen dos métodos para poder determinar  $J$ , el primero corresponde a  $J$  al método básico y el siguiente al método de la curva de resistencia. En el presente trabajo, se realiza el segundo método, de la curva de la resistencia, usando una sola probeta por curva.

En la presente tesis se desarrollará el ensayo de rotura utilizando el segundo método para la determinación de la curva de resistencia. Los valores definidos para el software Zwick, se han determinado a través de los requerimientos mencionados en el Método de Curva de Resistencia en el punto 1.6.6 y los parámetros se presentan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Datos de entrada al Software TestXpert II para ensayo de rotura

Parámetros de Tenacidad a la fractura						
Parámetro	udm	1er ensayo	2do ensayo	3er ensayo	4to ensayo	5to ensayo
Forma de la Probeta		Compact Specimen				
Pre ensayo Separación de grips	mm	10.53	10.4	10.7	10.51	10.54
Pre ensayo Velocidad en la posición inicial	mm/min	5	5	5	5	5
Pre-carga	N	1000	1000	1000	1000	1000
Velocidad de pre-carga	mm/min	1	1	1	1	1
Ciclos de acondicionamiento Cantidad de ciclos de acondicionamiento		3	3	3	3	3
Fuerza máxima antes del retorno en el ciclo	N	4000	4000	4000	4000	4000
Fuerza mínima antes del retorno en el ciclo	N	1000	1000	1000	1000	1000

	Velocidad de ciclos de acondicionamiento	mm/min	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Ciclo de medición de longitud de grieta	Número de ciclos: a0,est		3	3	3	3	3
	Fuerza máxima de retorno; ciclos a0 est	N	20817	18929	19082	21752	24754
	Fuerza mínima de retorno; ciclos a0est	N	10408.5	9464.5	9541	10876	12377
	Velocidad; ciclos a0,est	mm/min	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Ciclos de curvas R	Número de ciclos: Curvas R	-	10	10	15	15	15
	Fuerza inicial de ciclos curva R	N	10866	14985	14133	8704	6269
	Etapas de carga en ciclos curva R	N	25000	25000	25000	25000	25000
	Velocidad de carga en etapas, curvas R	mm/min	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	Velocidad de descarga en etapas, curvas R	mm/min	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	Crecimiento de grieta por etapa, curvas R	mm	0.0815	0.0945	0.092	0.0735	0.063

### 2.2.4 Cálculo de J para el Procedimiento Curva de Resistencia

Para poder definir correctamente el valor de J en un punto  $i$ , se debe realizar la corrección de la compliancia elástica del material, definida por la ecuación 21 y 22, las cuales definen el ángulo de rotación del cuerpo rígido de la probeta,  $\theta_i$ , y posteriormente la compliancia elástica en el punto  $i$ ,  $C_{C(i)}$ .

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[ \frac{\frac{dm}{2} + D}{(D^2 + R^2)^{1/2}} \right] - \tan^{-1} \left( \frac{D}{R} \right) \quad \text{Ec. 21}$$

$$C_{C(i)} = \frac{C_i}{\left( \frac{H^*}{R} \sin \theta_i - \cos \theta_i \right) \left( \frac{D}{R} \sin \theta_i - \cos \theta_i \right)} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde;

$\theta_i$  es el ángulo de rotación del cuerpo rígido de la probeta,

$R$  es  $(W + a)/2$  y  $W$  es el espesor de probeta y  $a$  la longitud de grieta

$D$  es la mitad de la distancia inicial entre las galgas extensométricas

$dm$  es la distancia medida por las galgas extensométricas

$H^*$  es la mitad de la distancia inicial de los puntos de carga

Una vez que se ha realizado el cálculo de la compliancia elástica,  $C_{C(i)}$ , se determina el valor adimensional,  $u$ , el cuál se encuentra en función de las propiedades del material así como de la compliancia  $C_{C(i)}$ , con la siguiente ecuación:

$$u = \frac{1}{(B_e * E * C_{C(i)})^{1/2} + 1} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde,  $B_e$  es el resultado de  $B - (B - B_N)^2/B$ .

Asimismo el determinar, el valor de  $u$  para el ensayo  $i$ , y, a partir de su cálculo, se determina  $a_i/W$ , y posteriormente  $f(a_i/W)$  con las ecuaciones 22 y 23.

$$\frac{a_i}{W} = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5 \quad \text{Ec. 24}$$

Una vez realizado el cálculo de  $a_i$  a partir de la ecuación 24, donde  $W$  es el espesor de probeta y es constante durante todo el ensayo; se determina el valor de  $f\left(\frac{a_i}{W}\right)$  con la ecuación 25, el cual es un valor intermedio usado para determinar  $K$  con la ecuación 26.

$$= \frac{f\left(\frac{a_i}{W}\right) \left\{ \left(2 + \frac{a_i}{W}\right) \left[ 0.886 + 4.64 \left(\frac{a_i}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_i}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_i}{W}\right)^4 \right] \right\}}{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \quad \text{Ec. 25}$$

$$K_{(i)} = \frac{P_{(i)}}{(BB_N W)^{1/2}} f\left(\frac{a_i}{W}\right) \quad \text{Ec. 26}$$

Donde  $P_{(i)}$  es el valor de la fuerza para cada punto  $i$  al que se somete la probeta. Una vez realizado el cálculo de  $K_{(i)}$  como valor de concentración de esfuerzos dentro del ensayo de rotura, para cada punto  $i$  dentro del ensayo, se realizan los cálculos para  $J$ . De acuerdo a ASTM E1820<sup>17</sup>, la ecuación 20, planteada anteriormente, se puede reformular para la curva de Fuerza versus Desplazamiento en un punto con  $a_{(i)}$ ,  $v_{(i)}$  y  $P_{(i)}$  con la siguiente ecuación.

$$J_{(i)} = \frac{(K_{(i)})^2 (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad \text{Ec. 27}$$

La ecuación 27, considera al igual a la ecuación 20, dos componentes; elástico y plástico. Sin embargo, el componente elástico está definido por el factor de concentración de esfuerzos en cada punto de la curva,  $K_{(i)}$ , y las propiedades mecánicas del material. Asimismo, el componente plástico es definido por  $J_{pl(i)}$  en la siguiente ecuación:

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{pl(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i-1)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \gamma_{(i-1)} \left( \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \right] \quad \text{Ec. 28}$$

Donde,

$$\eta_{pl(i-1)} = 2.0 + 0.522b_{(i-1)}/W, \text{ y}$$

$$\gamma_{(i-1)} = 1.0 + 0.76b_{(i-1)}/W$$

$A_{pl(i-1)} - A_{pl(i-1)}$  es el incremento del área plástica bajo la curva de fuerza versus desplazamiento plástico entre líneas de desplazamiento constante, como en la figura 2.6.

<sup>17</sup> *J Calculation for the Resistance Curve Test Method.* ASTM E 1820.

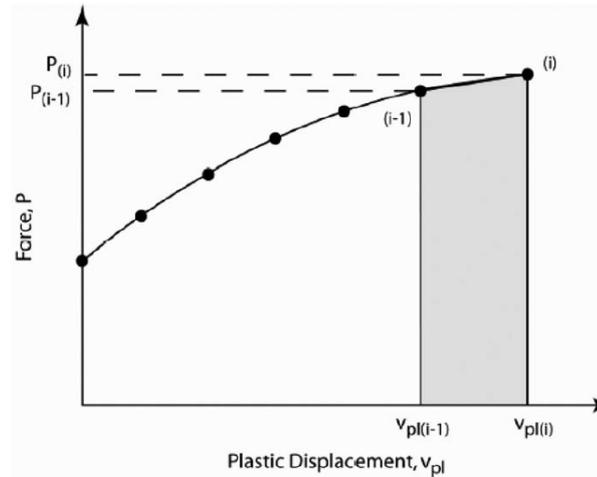


Figura 2.6: Desplazamiento plástico

La cantidad  $A_{pl(i)}$  se define por la siguiente fórmula:

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + \frac{[P_{(i)} - P_{(i-1)}][v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)}]}{2} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde,

$v_{pl(i)}$  es la parte plástica del desplazamiento de línea de carga,  $v_i - P_{(i)}C_{LL(i)}$

$C_{LL(i)}$  es la corrección experimental

Una vez realizado el cálculo para cada  $i$  se procede a realizar el gráfico de la Integral J versus la extensión de grieta.

### 2.2.5 Delimitación del gráfico de la Curva de Resistencia

De acuerdo con el Anexo 8 de ASTM E 1820, *J-R Curve Determination*, para poder desarrollar una correcta determinación de la curva se necesita en primer lugar medir la capacidad máxima de la probeta, la cual deberá ser menor que cualquiera de los dos resultados de las siguientes ecuaciones:

$$J_{max} = \frac{b_o \sigma_y}{10} = \frac{(W - a_o) \sigma_y}{10} \quad \text{Ec. 30}$$

$$J_{max} = \frac{B \sigma_y}{10} \quad \text{Ec. 31}$$

Y la longitud máxima de grieta para una probeta deberá ser:

$$\Delta a_{max} = 0.25b_o = 0.25(W - a_o)$$

Ec. 32

Los valores de la integral  $J$  y la correspondiente extensión de grieta están limitados en los ejes cuyos máximos serán los valores  $J_{max}$  y  $\Delta a_{max}$  planteados en las ecuaciones anteriores.

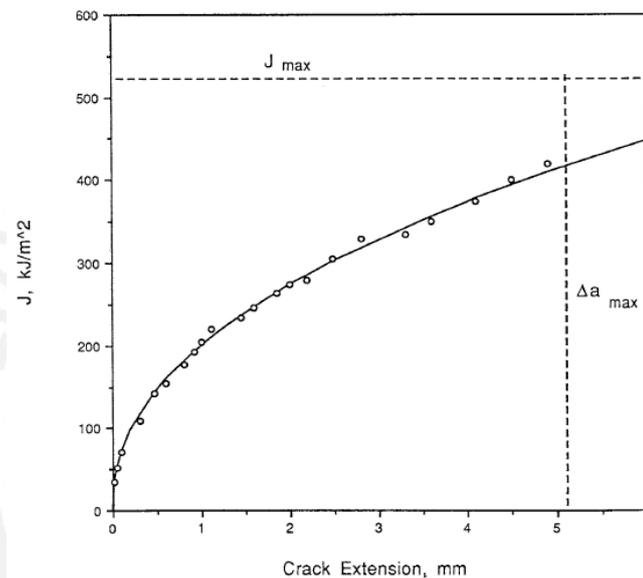


Figura 2.7: Curva J-R típica

### 2.2.6 Evaluación de $J_{IC}$ y $K_{JIC}$

De acuerdo a ASTM E 1820, la propiedad  $J_{IC}$  caracteriza la tenacidad de un material cerca al inicio de la extensión de una grieta preexistente causada por fatiga. El valor de  $J_{IC}$  marca el inicio de una etapa de un crecimiento de la resistencia del material.

La evaluación de  $J_{IC}$  busca corregir y ajustar la curva formada por el cálculo de  $J$  determinado en el punto 2.2.4 (*Cálculo de  $J$  para el Procedimiento Curva de Resistencia*).

El procedimiento inicia con identificar todos los pares de  $J_i$  y  $a_i$  que se han determinado antes que la probeta sea sometida a la fuerza máxima del ensayo. Se usa los pares para poder determinar, mediante un ajuste polinómico, el valor de  $a_{oq}$  mediante la siguiente ecuación:

$$a = a_{oq} + \frac{J}{2\sigma_Y} + BJ^2 + CJ^3 \quad \text{Ec. 33}$$

Donde,

$a_{oq}$  es la longitud inicial de grieta estimada,

$\sigma_Y$  es el esfuerzo en la probeta, y,

$B$  y  $C$  son constantes del ajuste polinómico.

Si el número de pares  $J_i, a_i$  para determinar  $a_{oq}$  es menor a 8 o de estos 8 hay menos de 3 entre  $0.4J_Q$  y  $J_Q$  o el coeficiente de la correlación del ajuste es menor a 0.96, los datos no son adecuados para evaluar la medición de la tenacidad de acuerdo al estándar ASTM E 1820.

En caso se use la medición óptica: si el tamaño de grieta,  $a_q$ , difiere de  $a_{oq}$  en más que  $0.01W$  o 0.5mm, los datos ya no son adecuados para el ensayo.

Al finalizar el cálculo de  $a_{oq}$ , se realizar el cálculo nuevamente de  $J_i$  con las ecuaciones planeadas en el punto 2.2.4 *Cálculo de J para el Procedimiento Curva de Resistencia*.

### 2.2.7 Cálculo de $J_Q$ Interno

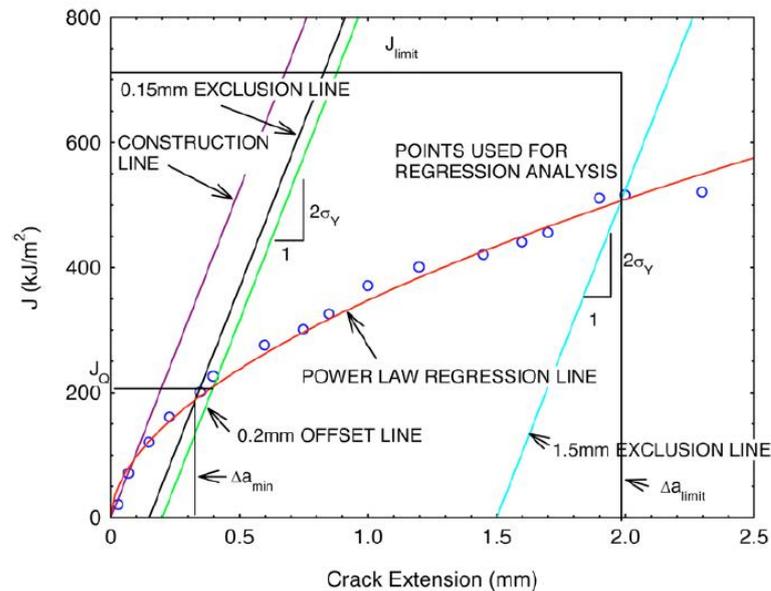
Debido a que se ha seleccionado el procedimiento de curva de resistencia, para cada valor de  $a_i$ , se calcula su correspondiente  $\Delta a_i$ , como sigue con la siguiente ecuación:

$$\Delta a_i = a_i - a_{oq} \quad \text{Ec. 34}$$

Se grafica  $J$  versus  $\Delta a$  como se muestra en la figura 2.8. Se determinan la línea de construcción de acuerdo con a la siguiente ecuación:

$$J = 2\sigma_Y \Delta a \quad \text{Ec. 35}$$

Asimismo, graficar también una segunda línea paralela a la línea de construcción que interseque al eje de las abscisas en el punto 1.5mm (0.06in). Estas dos líneas paralelas, así como la línea del  $J_{limit} = b_o \sigma_Y / 7.5$ , se grafican como límites a los puntos encontrados en los resultados del cálculo de  $J - \Delta a$ .



**Figura 2.8:** Definición de líneas de construcción para calificación de datos

Graficar una línea paralela a la construcción y línea exclusión en un valor de 0.2mm (0.008in.) en el eje de las abscisas. Al menos uno de los puntos de los pares de  $J - \Delta a$  deberá caer dentro de la región definida por las líneas paralelas a 0.5mm y 1.5 mm., los demás pares pueden estar en cualquier lugar dentro de la zona de exclusión. En el gráfico 2.9 se puede notar la región de datos calificados delimitada por las líneas paralelas antes mencionadas.

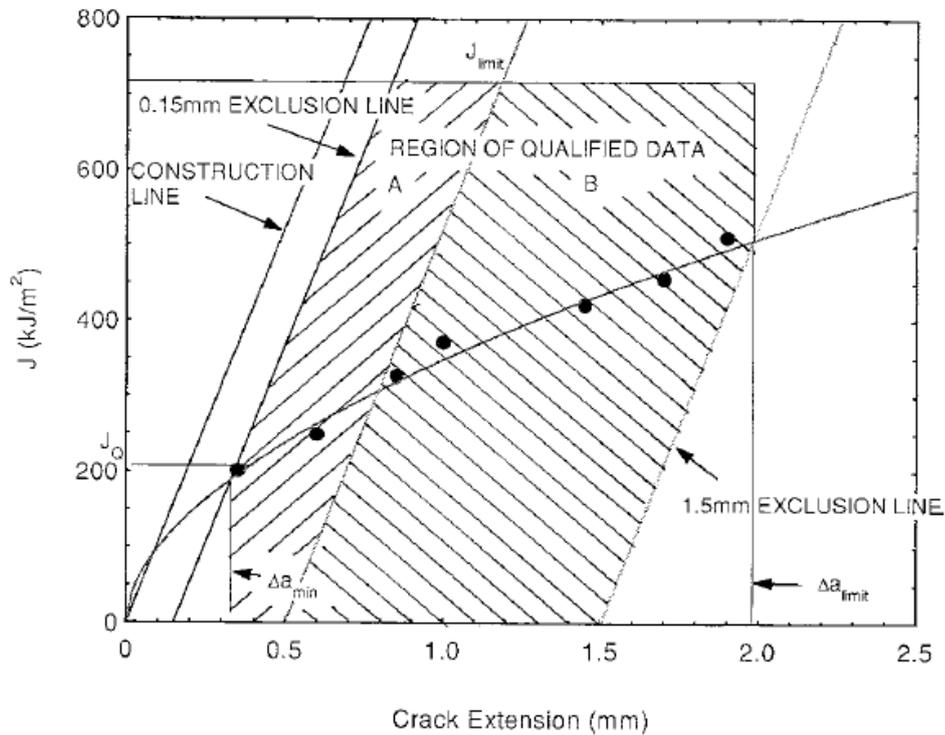


Figura 2.9 Definición de regiones para la Calificación de Datos

Después, se realiza el método de los menores cuadrados para determinar una línea de regresión lineal, como en la figura 2.8, con la forma de la siguiente ecuación:

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left( \frac{\Delta a}{k} \right) \tag{Ec. 36}$$

Donde  $k=1.0$  mm o 0.0394in. Se usa solamente los datos que conformen los requerimientos establecidos en las secciones anteriores, y se gráfica la línea de regresión como en la figura 2.9.

En caso no se pueda definir con exactitud la intersección, se define un estimado de la intersección de la línea de regresión de la ecuación 36 con la línea paralela distanciada en 0.2mm, como el par  $J_{Q(1)}$  y se determina  $\Delta a_{Q(i)}$ , con la siguiente fórmula:

$$\Delta a_{(i)} = \frac{J_{Q(i)}}{2\sigma_y} + 0.2mm \tag{Ec. 37}$$

Después se evalúa un  $J_{Q(i+1)}$  con la siguiente relación:

$$J_{Q(i+1)} = C_1 \left( \frac{\Delta a_{(i)}}{k} \right)^{C_2} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde,

$J_{Q(i+1)}$  es el valor de la integral  $J_Q$  en el instante  $i + 1$ ,

$\Delta a_{(i)}$  es la extensión estimada de grieta en el instante  $i$ ,

$k$  es una constante cuyo valor es 1.0 si se usan mm y 0.0394 si se usan pulgadas, y,

$C_1$  y  $C_2$  son constantes obtenidas de la ecuación 36.

Se iteran con las ecuaciones 37 y 38 hasta que los valores de dos  $J_Q$  contiguos tengan una diferencia menor a 2%, en caso, suceda dentro de la primera iteración se procede a detener el procedimiento y se asume el valor de  $J_Q$  y  $\Delta a_{(i)}$ .

Para calificar los resultados obtenidos en cálculo de  $J_Q$  interno como  $J_{Ic}$ , se necesita que cumpla con los siguientes criterios:

- El valor de  $C_2$  tiene que ser menor a 1.
- El valor del coeficiente de ajuste,  $R$ , debe ser mayor a 0.96.
- El espesor  $B > 10 J_Q / \sigma_Y$ .
- El espesor  $b_o > 10 J_Q / \sigma_Y$

Por último, si se ha cumplido con los requerimientos anteriores, se puede calcular  $K_{J_{Ic}}$  con la siguiente fórmula:

$$K_{J_{Ic}} = \sqrt{E' J_{Ic}} \quad \text{Ec. 39}$$

Usando,  $E' = E / (1 - \nu^2)$  y los valores determinados en la ecuación 38.

### 2.2.8 Calificación de los resultados

De acuerdo a ASTM E 1820<sup>18</sup>, los resultados deberán cumplir los siguientes requerimientos para estar calificados por el método de ensayos. En caso los resultados no pasen los requerimientos, no se puede realizar ninguna medición de tenacidad a la fractura de acuerdo con el método de ensayos.

Todos los requerimientos de este ensayo deberán cumplir con la Sección 6 de la norma, referente al equipo de medición y de ensayos. Entre estos requerimientos se

<sup>18</sup> 9.1.1 Qualification of Data. ASTM E 1820:2013

tiene que la precisión de las galgas extensométricas deberá ser  $\pm 1\%$  del rango final de trabajo, la señal del transductor deberá tener una resolución para desplazamientos de al menos 1 parte en 32000 en todo el rango de señal, y su estabilidad de  $\pm 4$  partes de 32000 en el rango del transductor. Asimismo, se menciona una dureza mínima de los pines de sujeción mayor a 40 HRC.

Todos los requerimientos de tolerancias en el mecanizado y pre fisura deberán ser cumplidos de acuerdo a la Sección 7 de la norma. En esta sección se menciona el requerimiento de las dimensiones de la muesca, con un radio de 0.08mm o menor, además, se dan dimensiones normalizadas para las configuraciones de pre fisura; considerando una altura máxima de muesca de  $0.063W$ , un ángulo de muesca máximo de  $60^\circ$  y una longitud mínima de pre fisura de  $0.05B$ . En esta sección también se menciona la forma en la que deberá extenderse la grieta por pre fisura dentro de una región aceptable de la muesca que no supere el ancho de ésta y la longitud que deberá tener la grieta por pre fisura para que ésta sea aceptable; entre  $0.45$  y  $0.7W$  para la determinación de  $J$  y  $\delta$ ; y  $0.45$  y  $0.55W$  para la determinación de  $K_{IC}$ .

Todos los requerimientos en el alineamiento del equipo, frecuencia de ensayo, estabilidad de temperatura y exactitud mencionadas en la Sección 8 de la norma, deberán ser cumplidos. Los principales requerimientos de esta sección de ASTM E 1820, es la temperatura de trabajo, cuya variación no deberá exceder en  $\pm 3^\circ\text{C}$  por cada  $\frac{1}{2} h/25$  mm de espesor de probeta, incluyendo también durante toda la duración del ensayo. Respecto a la alineación, se menciona que las líneas centrales de la probeta deberán ser coincidentes, así como la muesca para las galgas extensométricas, cuya diferencia no deberá ser mayor de 0.25 mm. La frecuencia no deberá exceder  $10^6$  ciclos por segundo, y la duración de la carga del ensayo deberá ser entre 0.3 y 3 minutos, con un tiempo de carga/descarga entre ensayos de no más de 10 minutos.

Asimismo, deberán cumplirse con los siguientes requerimientos planteados sobre el tamaño de la grieta en los ensayos<sup>19</sup>:

---

<sup>19</sup> Section 9. *Analysis of results: 9.1.4 – 9.1.5. ASTM E 1820.*

- Ninguna de las 9 mediciones realizadas del tamaño inicial de grieta definido en la Medición Óptica de Grieta deberá diferir en más de  $0.05B$  para el promedio  $a_o$ .
- Ninguna de las 9 mediciones realizadas del tamaño final de grieta definido en la Medición Óptica de Grieta deberá diferir en más de  $0.05B$  para el promedio  $a_p$ .

Además, los siguientes requerimientos se deberán cumplir en caso se use el método de Curva de Resistencia:

- Ninguno de las nueve mediciones de la extensión de grieta deberán ser 50% menor a la extensión promedio de grieta.
- La extensión de grieta,  $\Delta a_{predicted}$ , predicha a partir del método de compliancia elástica deberá compararse con la medición física de la extensión de grieta,  $\Delta a_p$ . La diferencia entre estos valores no deberá exceder el  $0.15 \Delta a_p$  para extensiones de grieta menores a  $0.2b_o$ , y la diferencia no deberá exceder  $0.03b_o$ .

## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización de la Muestra

##### 3.1.1 Dimensiones de la muestra

Mediante el uso del Vernier, se comprueba que la muestra obtenida del Laboratorio de Materiales PUCP (Figura 2.1) cumple con el rango permisible de espesores de estándar API 5L mencionados en la Tabla 1.5.

**Tabla 3.1:** Dimensiones de la muestra obtenida  
Del Laboratorio de Materiales PUCP

Diámetro exterior D mm (in)	Espesor de pared <i>t</i> mm (in) Tamaño regular
864 (34)	29 ( 1 1/8)

##### 3.1.2 Análisis Químico

Como parte de la caracterización de la muestra, se mecaniza una pequeña muestra (1" x 1") y es analizada mediante espectrometría de emisión según la norma ASTM E 415.

**Tabla 3.2:** Resultados del A.Q. según ASTM E 415

Elemento	% en masa
----------	-----------

Carbono	C	0.05
Silicio	Si	0.30
Manganeso	Mn	1.57
Fósforo	P	0.011
Azufre	S	0.002
Cromo	Cr	0.14
Molibdeno	Mb	0.01
Níquel	Ni	0.01
Aluminio	Al	0.03
Cobre	Cu	0.01
Niobio	Nb	0.06
Titanio	Ti	0.01
Vanadio	V	0.01

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 3.2, se calcula el Carbono Equivalente,  $CE_{Pcm}$ , por la fórmula de la ecuación 13<sup>20</sup>. Se obtiene como resultado,  $CE_{Pcm} = 0,15\%$  comprobando las características químicas planteadas en la Tabla 1.2.

### 3.1.3 Ensayo de Tracción

Se comprueban, mediante ensayos de tracción de acuerdo a la norma ASTM A 370, las características mecánicas de la muestra de la Tabla 1.3. En la tabla 3.3 se muestran los resultados de los dos ensayos, longitudinal y transversal.

**Tabla 3.3:** Resultados de Ensayos Mecánicos

Muestra	Área mm <sup>2</sup>	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo último a la tracción	Módulo de Young
		$\sigma_{YS}$ MPa	$\sigma_{TS}$ MPa	$E$ GPa
Longitudinal	123.11	484.53	553.16	213.16
Transversal	122.91	504.43	578.47	207.70
Promedio	123.01	494.48	565.82	210.43

Debido a que el módulo de Poisson solo se puede determinar usando métodos que definan su contante de rigidez,  $G$ , se opta por considerar este valor como 0.3. Asimismo, se determina  $\sigma_Y = 530.15$  MPa.

<sup>20</sup>  $C < 0.12\%$  en fracción molar

### 3.1.4 Ensayo de Impacto Charpy

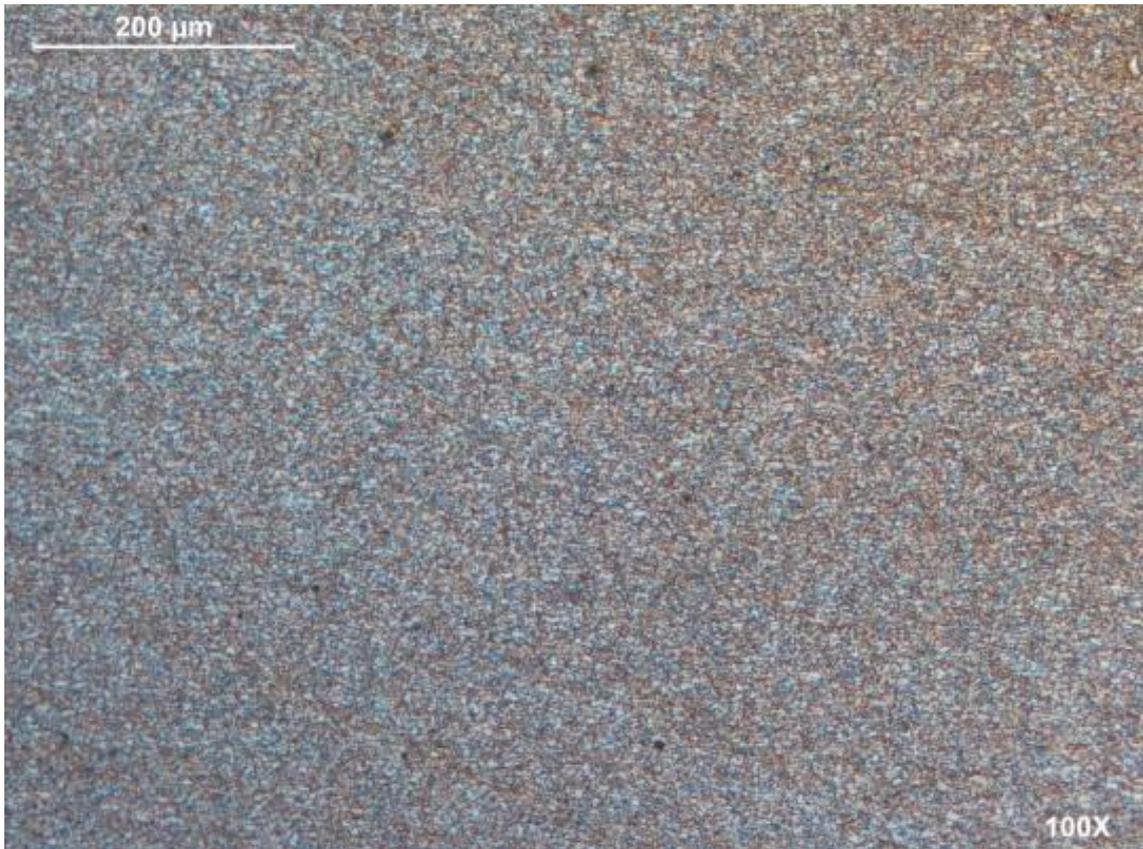
Se prepararon las 3 probetas, las cuales fueron ensayadas a 21.4°C, temperatura del ensayo de tenacidad a la fractura y dentro de la región de temperatura permisible  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Los valores resultantes se encuentran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4:** Resultados de Ensayos de Impacto Charpy

# Probeta Charpy	Temperatura de Ensayo °C	Energía Absorbida J
Probeta 1	21.4	417.3
Probeta 2	21.4	431.0
Probeta 3	21.4	436.7

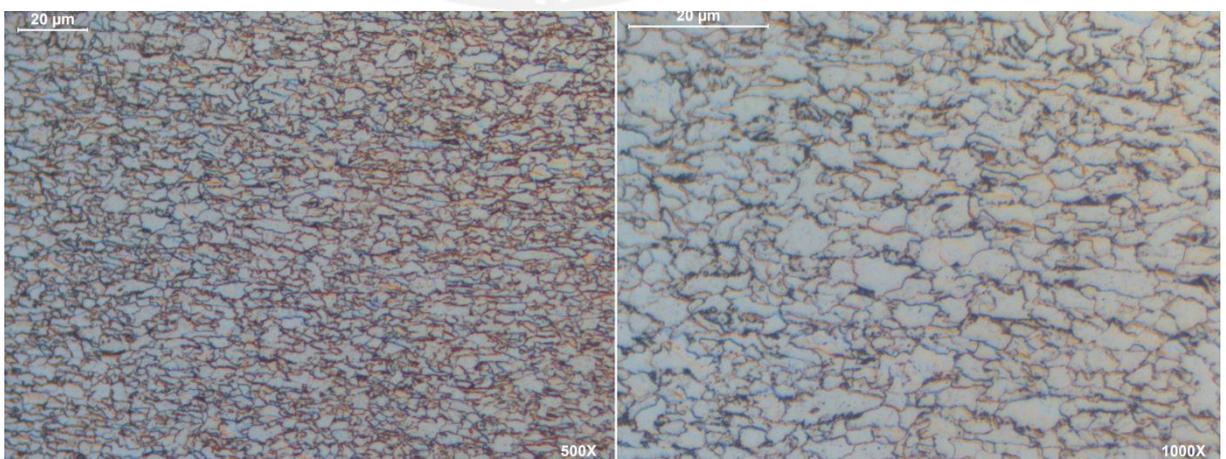
### 3.1.5 Ensayo de metalografía

Se realizan ensayos de metalografía en una probeta longitudinal con el fin de medir el tamaño de grano y corroborar su tenacidad. En la figura 3.1 se puede notar el tamaño del grano, de acuerdo a ASTM E112, mayor a 10.



**Figura 3.1:** Acercamiento 100x de muestra longitudinal

También se puede notar en la figura 3.2 la ferrita en grano fino; y en la misma figura, a 1000x se puede notar la presencia de perlita puntualmente expandido por todo el grano sin variar su tamaño y homogeneidad, esto corrobora cualitativamente la tenacidad medida en los ensayos de tracción e impacto.



**Figura 3.2** Acercamiento a 500x (lado izquierdo) y 1000x (lado derecho)

## 3.2 Ensayos de Tenacidad a la Fractura

### 3.2.1 Preparación de Probeta

Después de realizado el mecanizado final de la probeta de acuerdo a las dimensiones planteadas por la norma, se le colocan dos piezas de medición para poder controlar la apertura de boca durante la pre fisura de la probeta como en la figura 3.1.



Figura 3.3 Probeta CTOD con galgas de medición de apertura de boca

### 3.2.2 Pre fisuración de muestra

De acuerdo a lo planteado anteriormente en las ecuaciones 15, 16 y 17, así como los datos de entrada en la Tabla 2.1, se obtienen las dimensiones finales para la etapa de pre fisuración y se muestran en la Tabla 3.5. Asimismo, se determina, de acuerdo a la norma ASTM E 1820<sup>21</sup>, si es que las grietas son aceptables y se puede continuar con los ensayos de procedimiento básico. En la figura 3.2 se muestra la foto de una grieta generada, vista desde un estereoscopio con 10x aumentos.

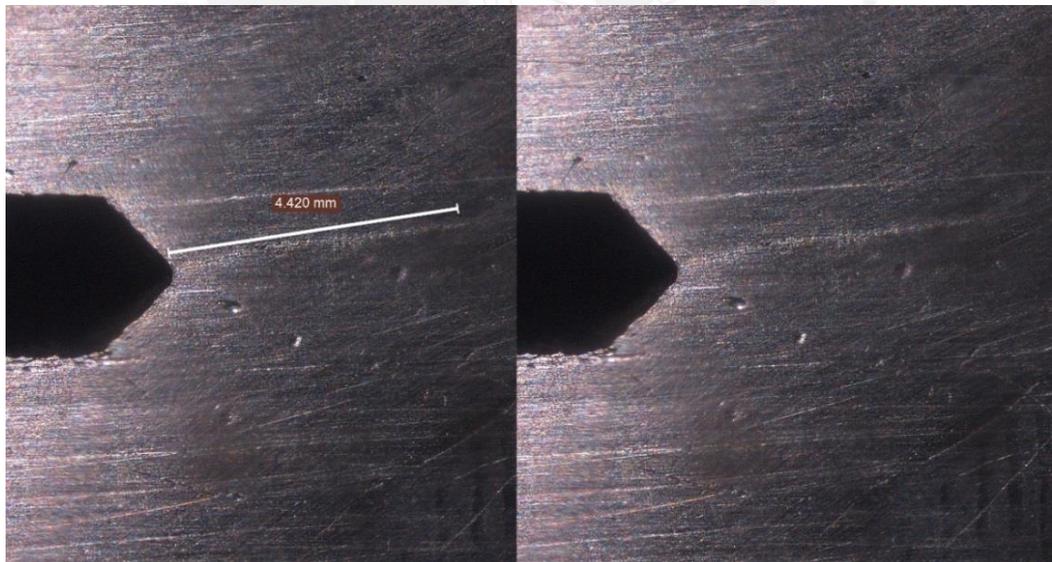
---

<sup>21</sup> ASTM E 1820. 7.4.2. *Fatigue crack size*

**Tabla 3.5:** Dimensiones finales de probetas pre fisuradas

Output	Unds	CTOD 1	CTOD 2	CTOD 3	CTOD 4	CTOD 5
Ao	Mm	18	18	18	18	18
Af	Mm	23.7	21.1	21.6	25.3	27.4
Pmin	N	2048	2094	1191	2362	3475
Pmax	N	20817	18929	19082	21752	24754
Kmax	MPa $\sqrt{m}$	119.5	53.4	111.8	135.8	154.7
Kmin	MPa $\sqrt{m}$	11.7	5.3	9.9	9.3	17.6
t ensayo	Seg	110	132	176	143	234
Temp.	°C	23.3	23.1	22.8	23.0	22.5
Conclusión $\dot{\epsilon} > 0.4W$ y $< 0.7W$ ?		Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable

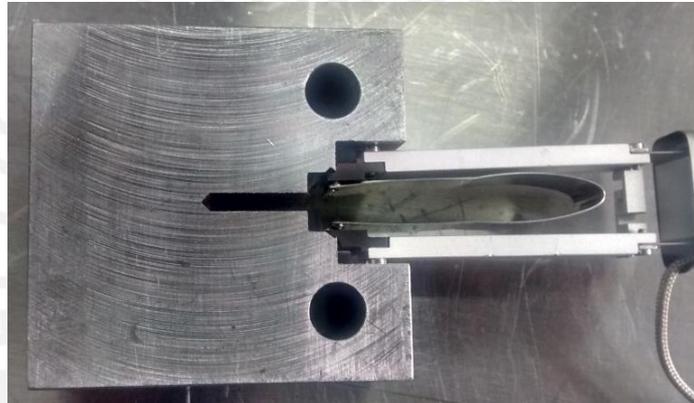
Como se puede observar en la Tabla 3.5, todas las grietas de pre fisura son aceptables y se puede proceder con el ensayo de rotura.



**Figura 3.4.** Foto de grieta generada en probeta CTOD 2.  
Vista desde un Esteroscopio en el Laboratorio de Materiales – PUCP.

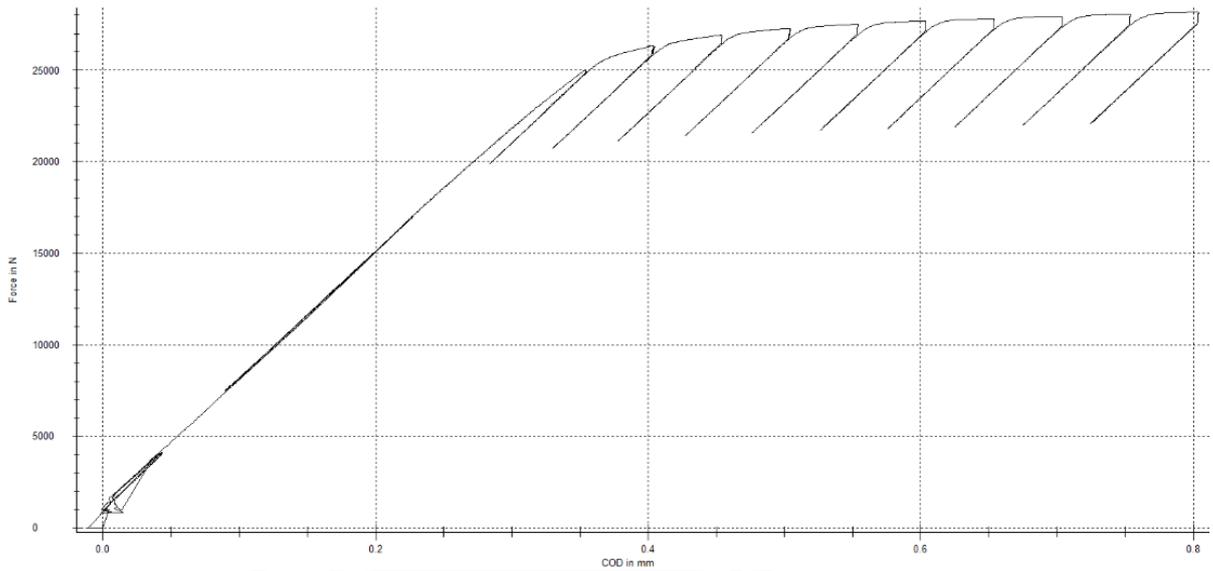
### 3.2.3 Ensayo de Rotura

El ensayo de rotura se realiza bajo los parámetros de la Tabla 2.2 y Tabla 3.5, como se puede apreciar en la última tabla, todos los valores de las grietas de pre fisura son aceptables ( $>0.45W$  y  $<0.7W$ ) y considerando la temperatura de ensayo dentro de un rango de  $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  como indica la norma. Además, para el ensayo de rotura se implementaron las galgas extensométricas en la ranura del segundo escalón de la probeta (Figura 3.3), como solicita la norma que debería hacerse la medición de extensión de grieta.



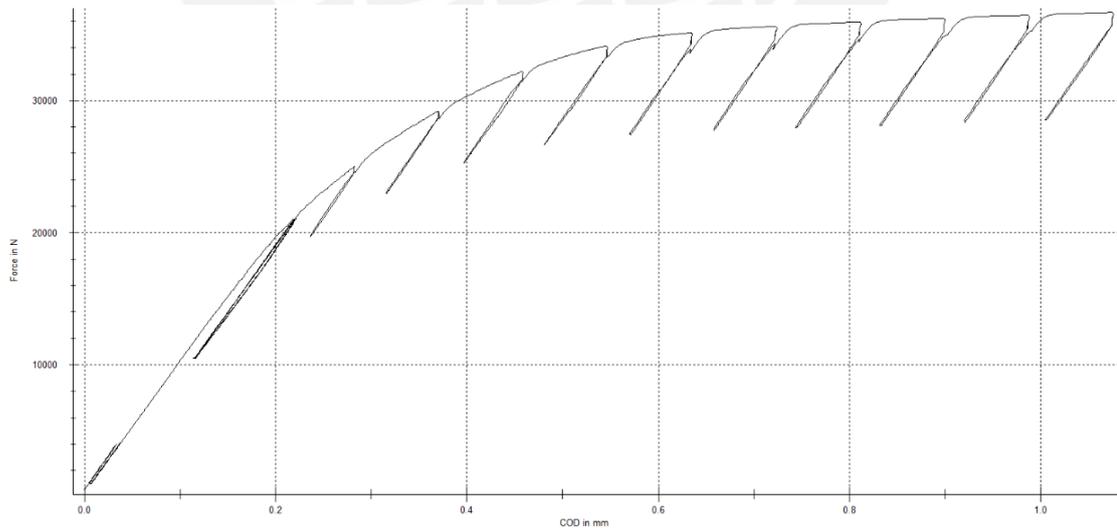
**Figura 3.5.** Posición correcta de galgas extensométricas para ensayo de rotura.

Asimismo, el software TestXpert II que usa la máquina de Tracción Zwick da como resultados una gráfica de apertura de boca (COD) vs Fuerza por cada ensayo, y a partir de estos resultados y mediante los cálculos planteados en el punto 2.2.4 se determina la Curva de Resistencia. Las curvas obtenidas del ensayo de rotura son las que se muestran en los siguientes gráficos 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.



**Figura 3.6.** Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°1.

Como se puede ver en la figura 3.4, el Ensayo de Rotura, el cual constaba de 10 Ciclos R, no presenta un gran crecimiento de boca de grieta respecto a la cantidad de Fuerza utilizada, esto demuestra cualitativamente el comportamiento tenaz del material API 5L, diseñado para grandes esfuerzos.



**Figura 3.7.** Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°2.

En la Figura 3.5, la medición de  $a_{o,est}$  tampoco se ve afectada, a pesar que la apertura tiene cierto desfase respecto a la curva; el proceso de carga-descarga en su estimación (3 veces) se da en una zona muy cerca. A diferencia del Ensayo de Rotura

N°1, las fuerzas alcanzadas en el ensayo de Rotura N°2 superan los 30 kN, con un mayor crecimiento de grieta

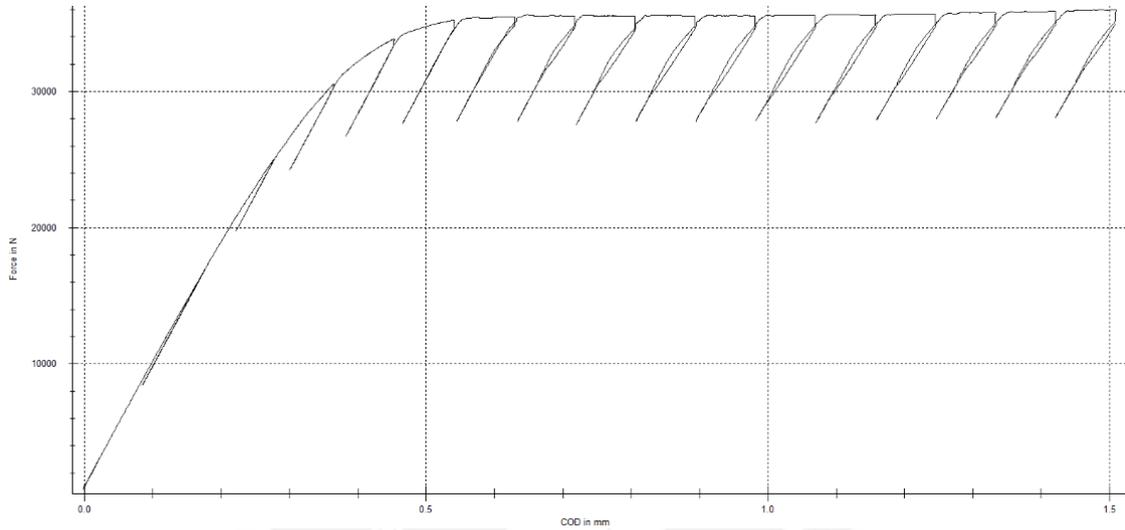


Figura 3.8. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°3.

Para el Ensayo de Rotura N°3, se disminuye la fuerza de acondicionamiento para que no se tenga crecimiento de apertura de boca y la medición de  $a_{o,est}$  sea más precisa; asimismo, se aumenta la cantidad de ciclos R para que se pueda hacer una validación más precisa de los resultados en el cálculo de J.

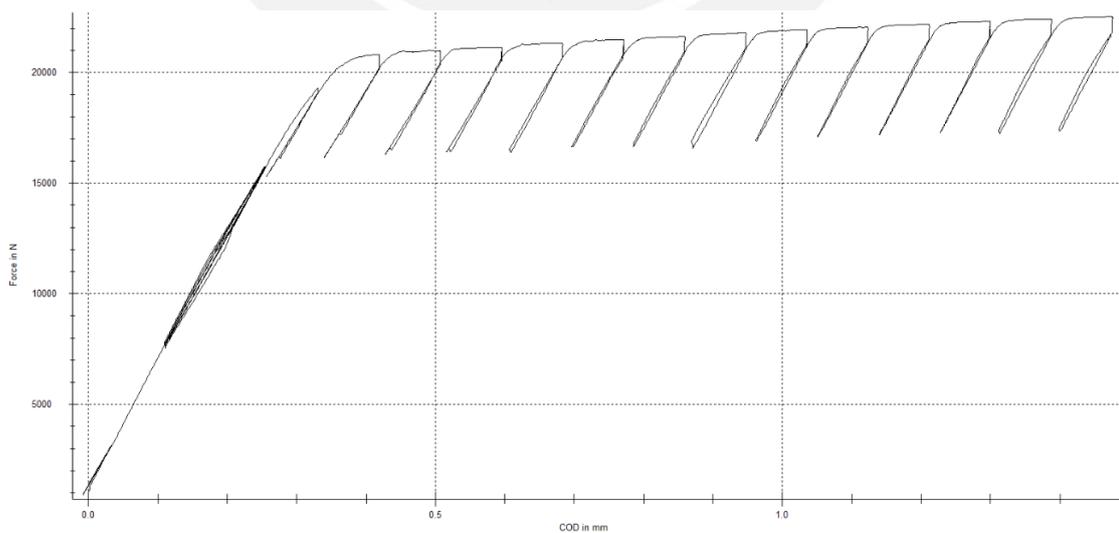
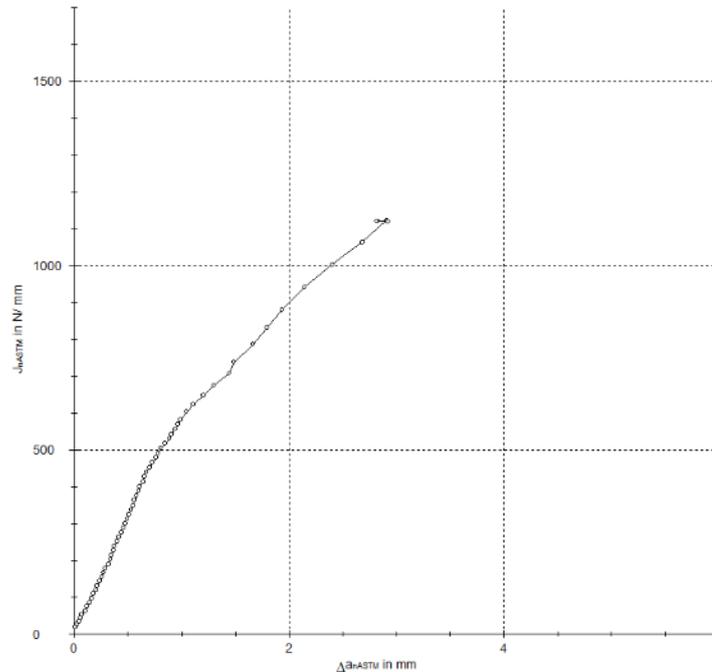


Figura 3.9. Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°4.

En la Figura 3.7, del ensayo de Rotura N°4, se da cierta inestabilidad causada debido a que la longitud inicial de grieta es muy alta (25.3 mm), esta inestabilidad también se mostró en las curvas R, debido a que los ciclos carga-descarga no fueron del todo lineales.



**Figura 3.10.** Gráfico COD vs. Fuerza de Ensayo de Rotura N°5.

Durante el ensayo de rotura de la quinta probeta, se produce una plastificación en el frente de grieta; debido a esto, la grieta no avanzó más, a pesar que la apertura de boca fue creciendo sustancialmente. El software en ese caso, calculó la integral J y entregó valores que se muestran en el gráfico 3.8, los cuales no son coherentes con los valores comunes encontrados para aceros API 5L<sup>22</sup>.

### 3.2.4 Cálculo de J

Se realiza el procedimiento planteado por ASTM E 1820, especificado en el punto 2.2.4 para determinar la Curva de Resistencia, y, a partir de ahí, y con los valores de los puntos de carga y descarga en las gráficas F vs COD, se determina la Integral J.

<sup>22</sup> Capelle, Furtado, Azari, Jallis y Pluvinage (2013) [22], Aguirre y Ferreira (2005) [23]

El gráfico relacionado a la Curva de Resistencia es aquél que relaciona los resultados del cálculo de  $J$  versus la extensión de grieta calculado a partir de la apertura de grieta.

De los gráficos mostrados en el punto 3.2.3 se realiza el cálculo de  $J$ , a partir de ahí se tiene los diferentes resultados para los ensayos en la siguiente tabla 3.6. Asimismo, en la tabla se menciona la temperatura a la que se ensayaron las diferentes probetas, realizado en dos grupos diferentes de ensayo; primero y segundo ensayo en un primer grupo y los 3 restantes en un segundo grupo; sin embargo, el quinto ensayo no se puede validar y no se calcula  $J$ .

**Tabla 3.6:** Dimensiones finales de probetas pre fisuradas

Ciclos R	Primer Ensayo (Temp. 22.6°C)		Segundo Ensayo (Temp. 22.6°C)		Tercer Ensayo (Temp. 21.3°C)		Cuarto Ensayo (Temp. 21.3°C)	
	J	$\Delta a$	J	$\Delta a$	J	$\Delta a$	J	$\Delta a$
	kJ/m <sup>2</sup>	mm	kJ/m <sup>2</sup>	mm	kJ/m <sup>2</sup>	mm	kJ/m <sup>2</sup>	mm
1	50.61	0.000	94.37	0.000	68.03	0.000	21.82	0.000
2	61.31	0.204	121.53	0.205	103.96	0.213	74.67	0.272
3	78.32	0.493	149.84	0.238	126.39	0.233	81.60	0.349
4	113.69	0.891	163.91	0.299	135.96	0.237	102.45	0.599
5	164.92	1.161	261.68	1.166	155.19	0.547	121.72	0.853
6	203.68	1.325	274.95	1.225	173.56	0.834	141.38	1.075
7	241.09	1.452	244.14	1.493	190.33	1.107	154.44	1.172
8	277.33	1.582	245.80	1.507	208.04	1.284	168.79	1.281
9	303.75	1.703	264.27	1.611	222.43	1.449	191.65	1.448
10	330.48	1.855	316.74	1.829	231.14	1.534	210.53	1.696
11	-	-	-	-	246.59	1.542	240.06	1.955
12	-	-	-	-	261.80	1.648	239.60	1.969
13	-	-	-	-	272.05	1.718	266.20	2.081
14	-	-	-	-	292.47	1.802	310.79	2.249
15	-	-	-	-	316.87	1.816	333.59	2.308

Como se puede notar, se utilizan diferentes ciclos R por probeta, 10 y 15 respectivamente; a pesar que ASTM E 1820 tiene como requerimiento mínimo de 8 puntos validados dentro del ensayo, se consideran estas cantidades para asegurar una mayor cantidad de puntos dentro del rango calificable en la Curva de Resistencia.

En el gráfico 3.9, se han ubicado los diferentes puntos medidos para los valores determinados de  $J$  y su respectivo crecimiento de grieta. Se puede notar que mediante más puntos se han considerado dentro de la curva, hay mayor precisión para poder obtener una curva de ajuste que más se aproxime al comportamiento de la grieta.

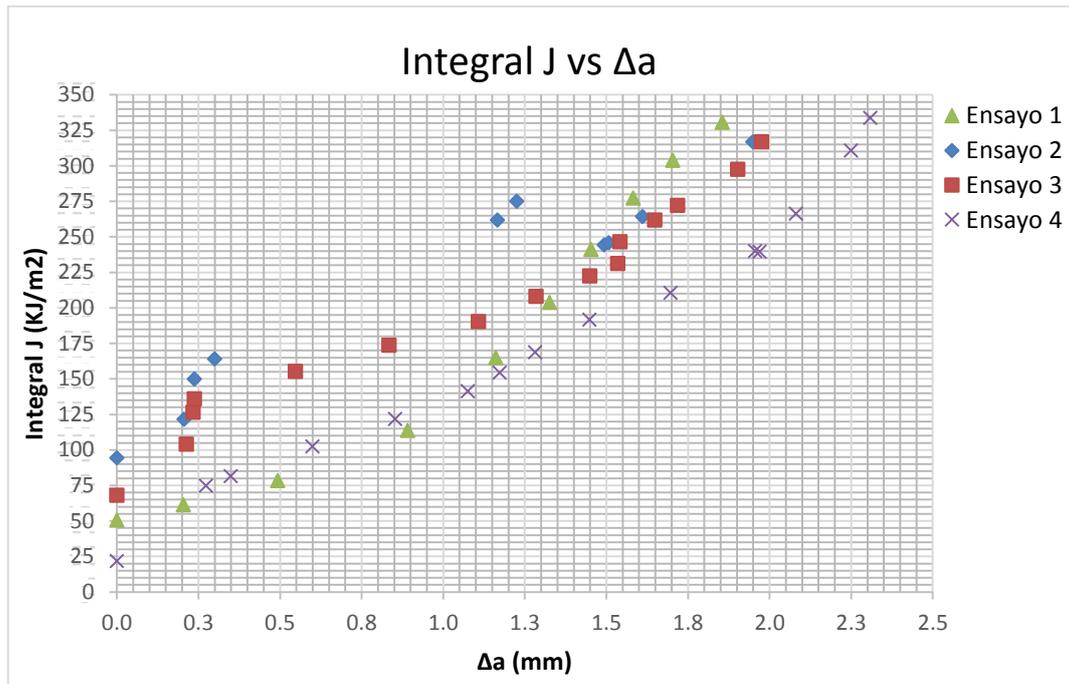


Figura 3.11. Gráfico  $J$  vs  $\Delta a$  de los Ensayos 1,2, 3 y 4.

### 3.2.5 Determinación de la Curva de Resistencia

Para la determinación de la curva de Resistencia definida en el punto 2.2.5 se realiza una medición de la capacidad de la probeta de acuerdo a sus dimensiones iniciales de grieta.

Usando las ecuaciones 29, 30 y 31 se determina los valores límite de la curva J-R para los diferentes ensayos.

Tabla 3.7: Valores límite para  $J_{max}$  y  $\Delta a_{max}$

$J_{max}$ (Ec. 29)	$J_{max}$ (Ec.30)	$\Delta a_{max}$ (Ec.31)
-----------------------	----------------------	-----------------------------

	N/mm	N/mm	mm
Primer Ensayo	864.14	1060.3	4.075
Segundo Ensayo	1001.98	1060.3	4.725
Tercer Ensayo	975.48	1060.3	4.60
Cuarto Ensayo	779.32	1060.3	3.675
Quinto Ensayo	667.99	1060.3	3.150

### 3.2.6 Ajuste de longitud grieta inicial real : $a_{0q}$

Como primer paso, se grafican las curvas de crecimiento de grieta vs Integral J, siendo J el valor de las abscisas, y se le realiza un ajuste polinómico de tercer grado para que obtenga la forma de la ecuación 32.

En los gráficos 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 se pueden ver los diferentes gráficos correspondientes a los cuatro primeros ensayos.

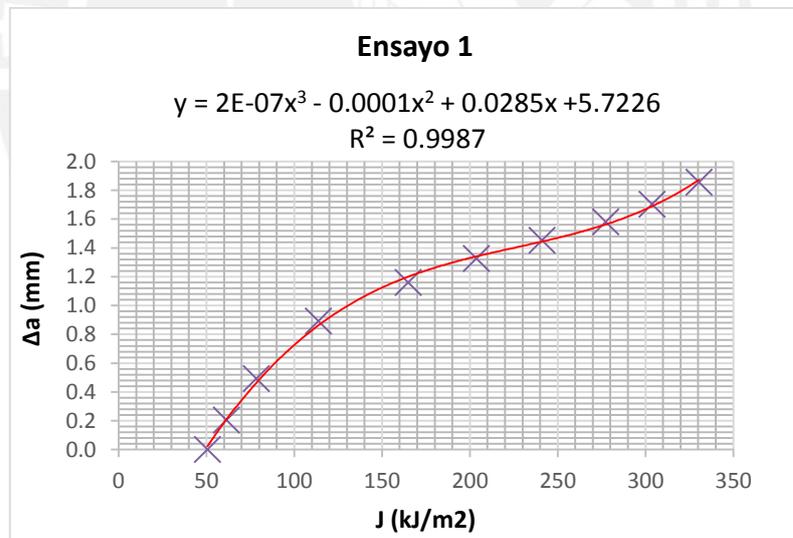


Figura 3.12. Gráfico  $\Delta a$  vs. J de Ensayo de Rotura N°1.

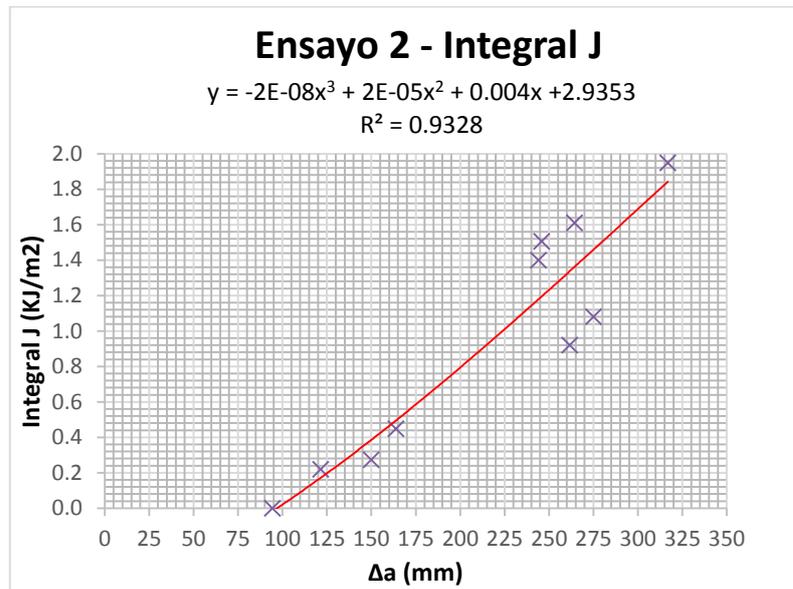


Figura 3.13. Gráfico Δa vs. J de Ensayo de Rotura N°2

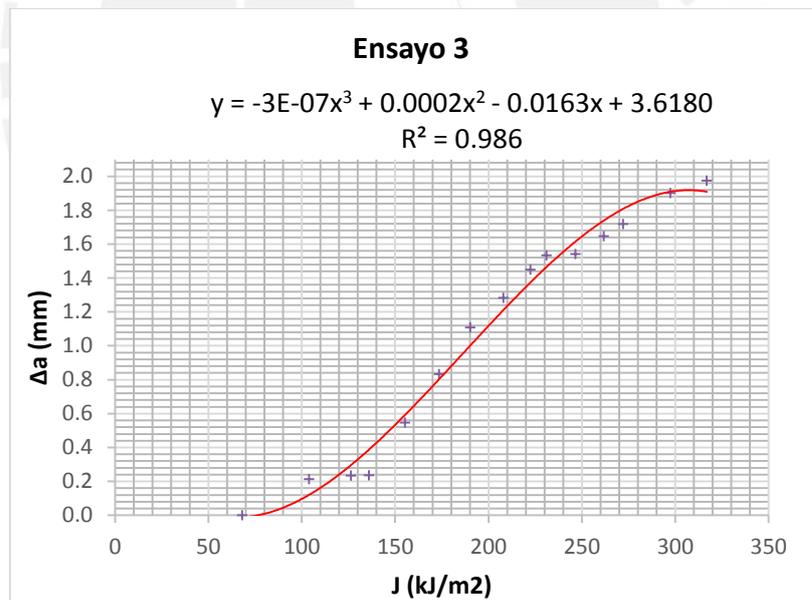
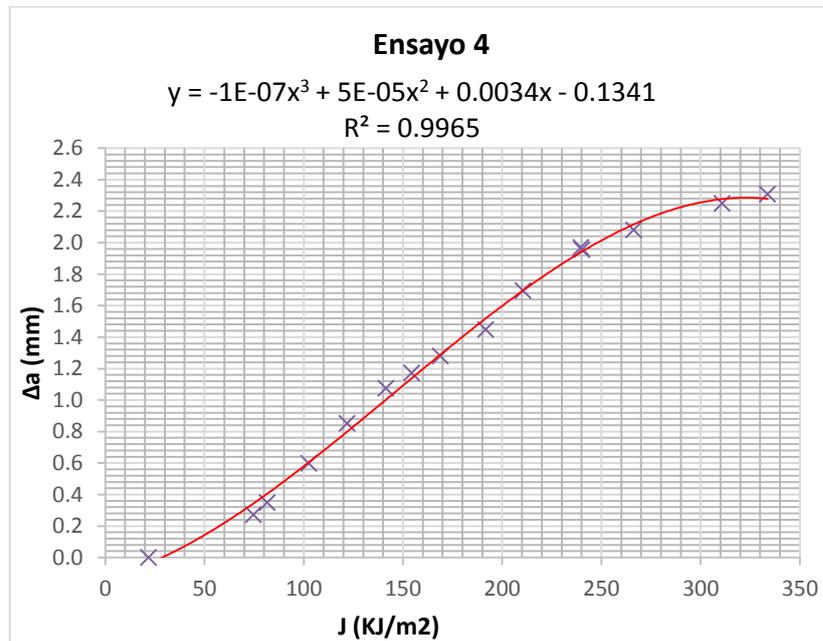


Figura 3.14. Gráfico Δa vs. J de Ensayo de Rotura N°3



**Figura 3.15.** Gráfico  $\Delta a$  vs.  $J$  de Ensayo de Rotura N°4

De los diferentes gráficos, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13, se puede determinar los valores de  $a_{oq}$ ,  $B$  y  $C$ ; necesarios para la validación con la medición óptica de la longitud inicial real de grieta, medida en el SEM.

**Tabla 3.8:** Valores estimados de la aproximación polinómica

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
$a_{oq}$	5.7226	2.9353	3.618	-0.1341
$B$	-0.0001	0.0001	0.0002	5E-05
$C$	2E-07	-2E-07	-3E-07	-1E-07
$R$	0.998	0.967	0.993	0.999
$a_o$	5.728	3.251	3.613	5.861
$a_p$	7.415	4.936	5.321	6.560
$\Delta(a_p - a_o)$	1.687	1.685	1.708	0.699
	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple

Como se puede ver en la Tabla 3.8, los valores determinados del  $a_{oq}$  real no difieren en más de 0.5mm de los determinados por el ajuste y el R es mayor que 0.96 en los primeros 3 ensayos. El cuarto ensayo presenta diferencias en la determinación del

valor de  $a_{oq}$  todos los casos, por ende, los cuatro ensayos son validados bajo estos términos.

### 3.2.7 Medición óptica de la longitud de grieta real, $a_{oq}$

Los valores reales de  $a_o$ , así como los valores finales de la longitud de grieta,  $a_p$  se han determinado con ayuda de un estereoscopio en el Laboratorio de Materiales PUCP. Los promedios<sup>23</sup> de estos resultados son presentados en los siguientes gráficos:

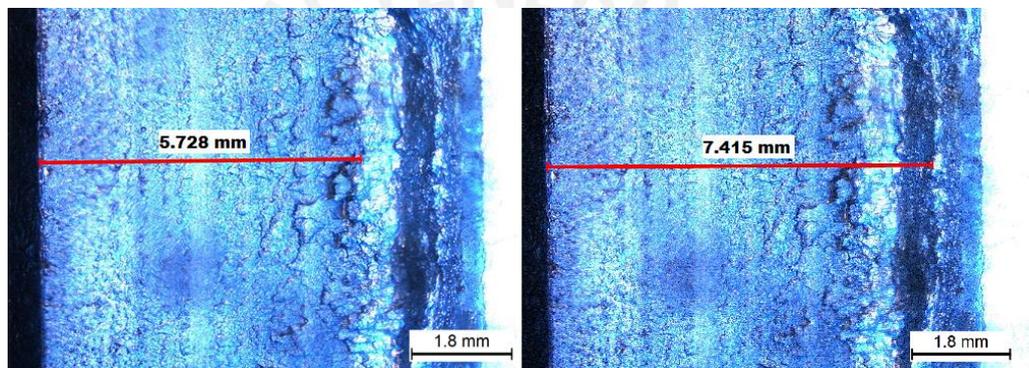


Figura 3.16 Medición de tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°1

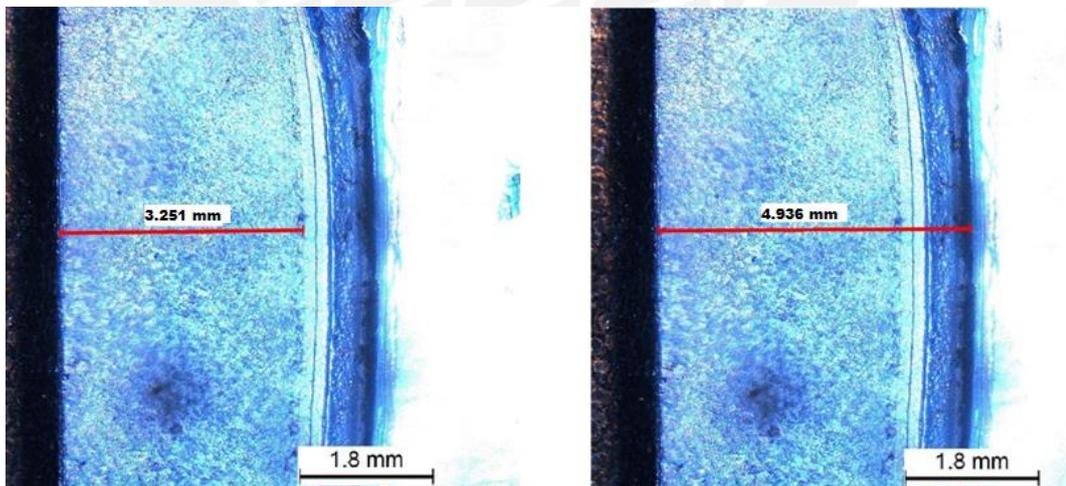


Figura 3.17. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°2

<sup>23</sup> Revisar 3.2.10 por los 9 valores tomados por grieta.

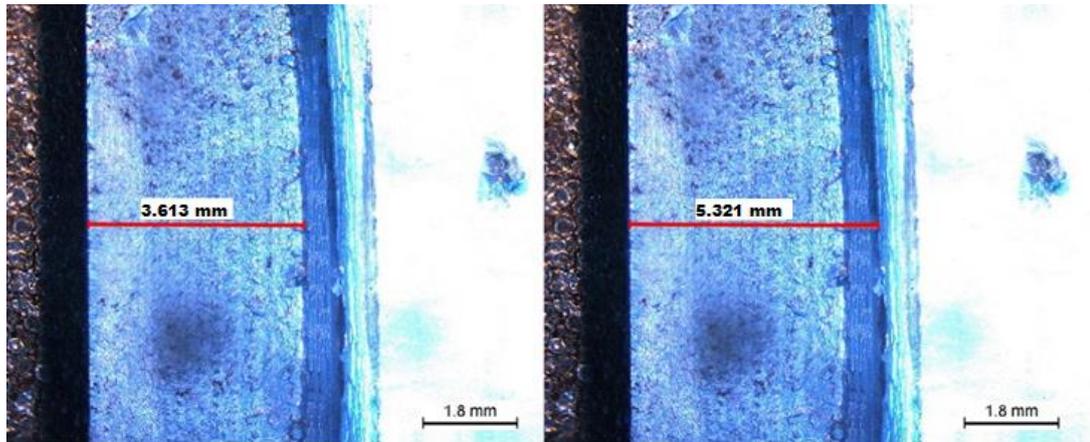


Figura 3.18. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°3

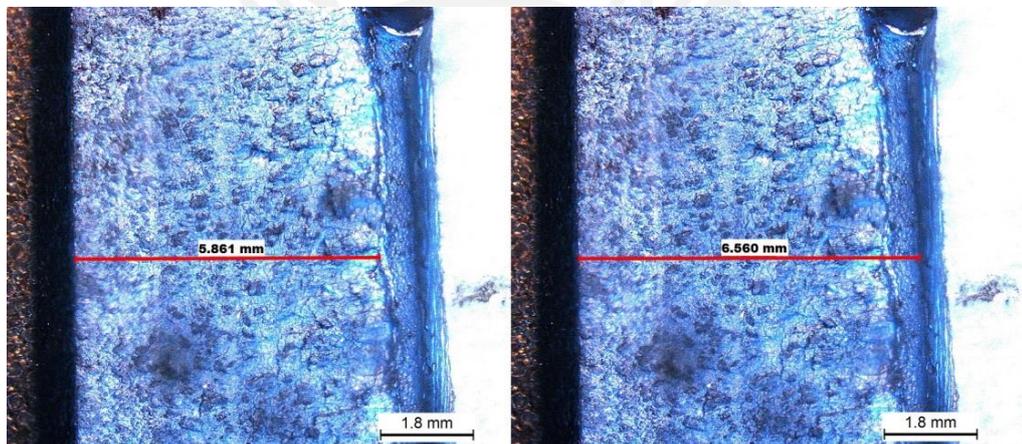


Figura 3.19. Medición del tamaño de grieta inicial y final en ensayo N°4

A partir de estos resultados se puede validar la longitud final, así como la longitud inicial real de la grieta; corroborando lo estimado a partir de los ensayos de tenacidad a la fractura. Como se puede observar, el frente de grieta ha ido avanzando de manera estable durante el ensayo. Esto ha dado como resultado mediciones útiles y validables para los tres primeros ensayos, de acuerdo a los criterios planteados en 2.2.8.

### 3.2.8 Cálculo de $J_Q$ interno

Una vez validados los resultados medidos de  $a_o$  y  $a_p$ , se procede a realizar nuevamente el cálculo de  $J_i$ , considerando como nuevo  $a_{oq}$  el valor medido en  $a_o$ . En la tabla 3.9 se muestran los resultados del nuevo cálculo para los tres ensayos validados. Asimismo, se toma en consideración  $\Delta a_i = a_i - a_{oq}$  para realizar el gráfico final de la curva  $J$ .

**Tabla 3.9:** Valores finales de  $J_i$  vs  $\Delta a$ 

Ciclos R	Primer Ensayo		Segundo Ensayo		Tercer Ensayo	
	J	$\Delta a$	J	$\Delta a$	J	$\Delta a$
	kJ/m <sup>2</sup>	mm	kJ/m <sup>2</sup>	mm	kJ/m <sup>2</sup>	mm
1	50.60	0.000	95.73	0.000	68.03	0.000
2	61.30	0.204	120.03	0.220	104.08	0.213
3	78.32	0.493	143.58	0.274	126.51	0.233
4	113.69	0.891	157.64	0.448	136.08	0.237
5	164.92	1.161	256.48	0.921	155.31	0.547
6	203.68	1.325	269.82	1.081	173.67	0.834
7	241.09	1.452	238.74	1.399	190.44	1.107
8	277.32	1.582	240.39	1.507	208.15	1.284
9	303.74	1.703	258.97	1.611	222.53	1.449
10	330.47	1.855	311.81	1.829	231.24	1.534
11	-	-	-	-	246.69	1.542
12	-	-	-	-	261.90	1.648
13	-	-	-	-	272.15	1.718
14	-	-	-	-	297.56	1.802
15	-	-	-	-	316.96	1.816

Como se puede notar en la tabla 3.9, los valores corregidos de  $J_i$  no difieren mucho respecto a los anteriores, hasta 5% de variación respecto a los valores de la tabla 3.6. Además, se puede notar que el crecimiento de grieta no ha variado respecto al primer cálculo; esto se debe a que la longitud de grieta inicial es usada para definir un parámetro de referencia respecto al crecimiento. Es decir, el valor de  $\Delta a$  es independiente al tamaño inicial de longitud de grieta y depende de la apertura del frente de grieta. El valor de  $a_o$  es útil en el primer paso del cálculo para determinar el valor de la deformación plástica inicial,  $A_{pl,o}$ , sin embargo, el crecimiento del valor de la deformación plástica es mucho más alto en los demás puntos, esto hace que la variación del uso de  $a_o$  y  $a_{oq}$  sea despreciable.

Se realiza la gráfica  $J_i$  vs.  $\Delta a_i$ , a la cual se le realiza un ajuste logarítmico y se le intersecta con el trazado de la función lineal de la ecuación 34, trasladada en el origen, en 0.5mm y 1.5 mm de crecimiento de deformación. También se realiza el mismo trazado de la función 34 a la altura de 0.2mm, intersección que sirve para determinar  $J_Q$  y  $\Delta a_Q$ .

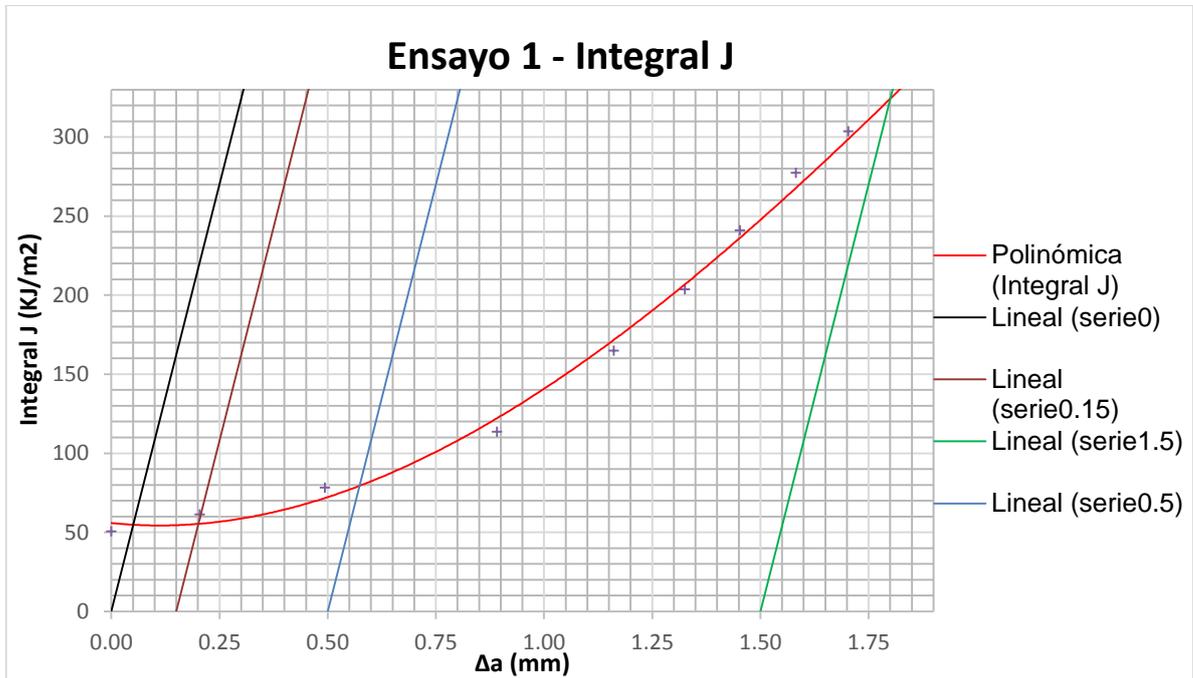


Figura 3.20. Gráfico J vs  $\Delta a$  de Ensayo de Rotura N°1

En el gráfico 3.18 del ensayo N°1 se puede notar que entre los límites 0.15mm y 0.5mm se encuentra al menos un punto, lo cual valida el ensayo realizado y permite que se realice la determinación de  $J_Q$ .

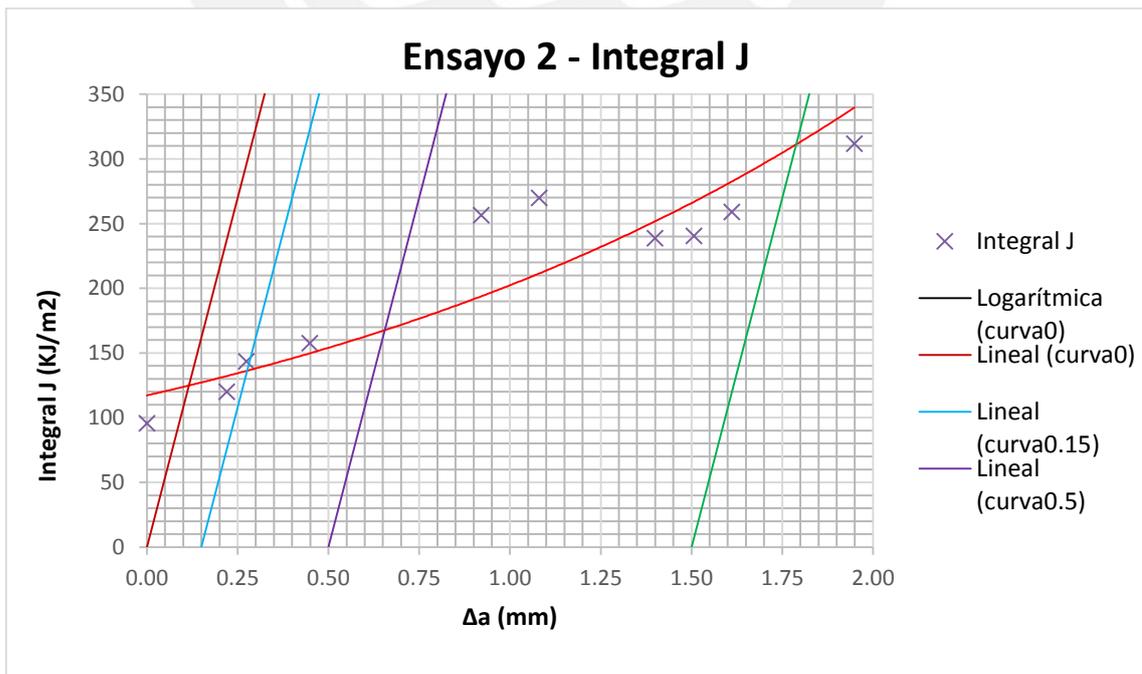


Figura 3.21 Gráfico J vs  $\Delta a$  de Ensayo de Rotura N°2

En el gráfico 3.19 correspondiente al ensayo N°2, se puede observar que entre las líneas de 0.15 mm y 0.5mm se encuentra un valor de  $J_i$ ; por esta razón, el ensayo N°2 también es válido para poder determinar un valor de  $J_Q$ .

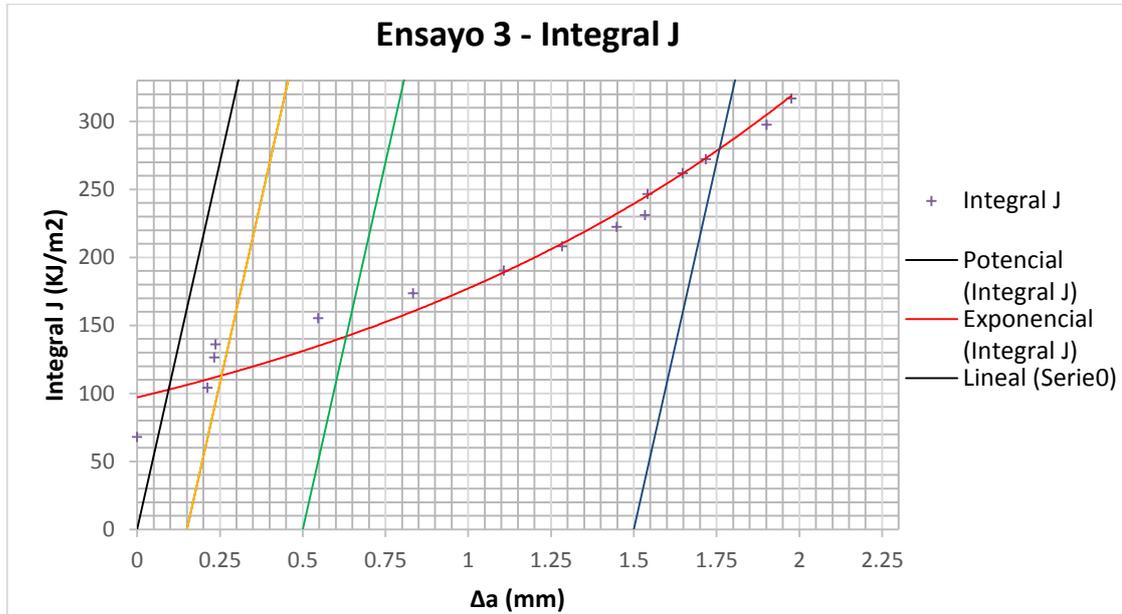


Figura 3.22 Gráfico J vs  $\Delta a$  de Ensayo de Rotura N°3

En la figura 3.20 del ensayo N°3, se observa que, entre las líneas 0.15mm y 0.5mm, se encuentran valores de  $J_i$  y los resultados de este ensayo se validan. Finalmente, los tres ensayos se han validado y se pueden usar para determinar el valor de  $J_{IC}$  y  $K_{JIC}$ .

### 3.2.9 Evaluación de $J_{IC}$ y $K_{JIC}$

Usando el método de los cuadrados se determina la regresión lineal logarítmica para los dos ensayos que han sido validados y se obtienen tres funciones de la forma de la ecuación 36.

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left( \frac{\Delta a}{k} \right) \tag{Ec.36}$$

Para el ensayo N°1, se tiene:

$$\ln J = 5.1082 + 0.803 \ln(\Delta a) \tag{Ec. 40}$$

Donde  $C_1 = 165.3724$  y  $C_2 = 0.803$  para la ecuación 40.

Para el ensayo N°2, se tiene:

$$\ln J = 5.3592 + 0.3562 \ln(\Delta a) \quad \text{Ec. 41}$$

Donde  $C_1 = 212.5336$  y  $C_2 = 0.3562$  para la ecuación 41.

Para el ensayo N°3, se tiene:

$$\ln J = 5.2583 + 0.3818 \ln(\Delta a) \quad \text{Ec. 42}$$

Donde,  $C_1 = 192.1546$  y  $C_2 = 0.3818$  para la ecuación 42.

A estas funciones se les intersecta con una línea paralela a la línea de construcción de la ecuación 35 ( $J = 2\sigma_Y \Delta a$ ) con punto de inicio donde  $\Delta a = 0.2mm$ . Esta ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} J &= 2 * 530.15 * (\Delta a - 0.2) \\ J &= 1060.3 * (\Delta a - 0.2) \end{aligned} \quad \text{Ec. 43}$$

Mediante métodos computaciones, se define las intersecciones de las ecuaciones 40, 41 y 42 con la ecuación 43 para obtener los valores de  $\Delta a_Q$  y  $J_Q$ , y los resultados se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.10).

**Tabla 3.10** Resultados de  $\Delta a_Q$  y  $J_Q$

	Unds	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
$\Delta a_Q$	mm	0.28148	0.33924	0.316686
$J_Q - J_{IC}$	N/mm	87.9984	150.3803	126.0204

Se realizó también la verificación de los criterios planteados para la evaluación de  $J_{IC}$  y  $K_{JIC}$  y se realiza el cálculo final de  $K_{JIC}$ . Los resultados se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.11). Se ha considerado el valor de  $E' = 231.242$  GPa producto del cálculo con los valores de  $E$  y  $\nu$  determinados en 3.1.3.

**Tabla 3.11** Verificación de datos y cálculo de  $J_{KIC}$

	Unds	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
$i C_2 < 1?$	-	Sí	Sí	Sí
$i R > 0.96?$	-	Sí	Sí	Sí
$i B > \frac{10J_Q}{\sigma_Y}?$	-	Sí $20 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$	Sí $20 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$	Sí $20 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$
$i b_o > \frac{10J_Q}{\sigma_Y}?$	-	Sí $16.3 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$	Sí $18.9 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$	Sí $18.4 > 10 * \frac{55.6}{530.15}$
$K_{JIC} = \sqrt{E'J_{IC}}$	N – mm <sup>-3/2</sup>	4510.978	5896.968	5398.261
	MPa √m	142.65	183.44	170.67

Como se puede notar en el cálculo de  $\Delta a_Q$ ,  $J_Q$  y  $J_{KIC}$ ; los resultados pueden verificarse en la figura 3.21 que muestra el comportamiento experimental de API 5L X65 sometido a ensayos de tenacidad a la fractura. Esta figura muestra los resultados obtenidos por los tres ensayos tras los cálculos de  $J_Q$  y  $J_{IC}$  (tabla 3.10) aproximados con un ajuste de la forma  $J_Q = C_1 * \Delta a_{(t)}^{C_2}$ ; donde se ha seleccionado el valor de  $C_1$  y  $C_2$  para el ensayo intermedio (2do ensayo).

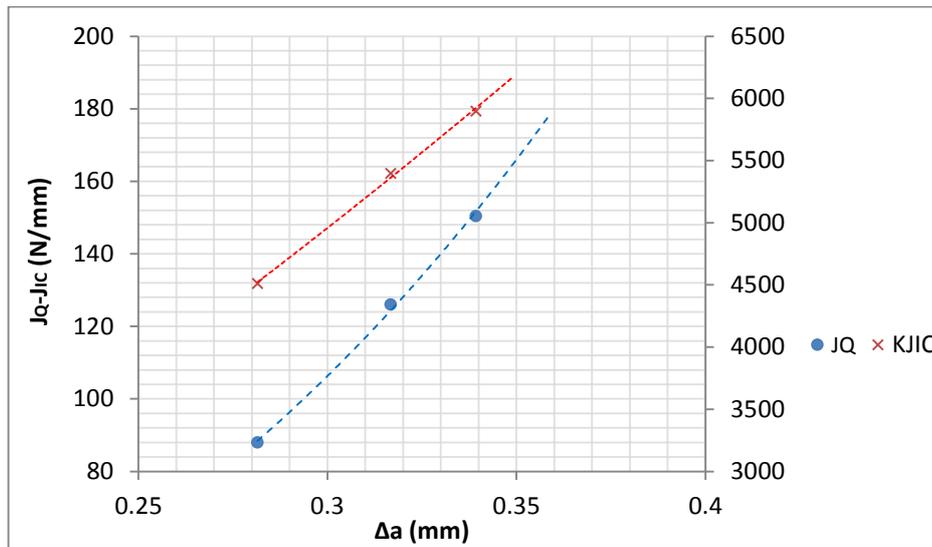


Figura 3.23 Resultados de  $J_Q$  y  $J_{IC}$

### 3.2.10 Comprobación de los criterios de validez de ASTM E 1820.

Se corroboran los resultados con los criterios de validez planteados en el punto 2.2.8. de la presente tesis. Se inicia con la comprobación de equipos de medición y de ensayos, los cuales cumplen con los criterios de validez de acuerdo a los manuales de uso de sus diferentes equipos<sup>24</sup>. Asimismo, se realiza una verificación de las tolerancias de mecanizado y pre fisura de acuerdo al plano entregado para su respectivo electro erosión. Finalmente, se verifica el alineamiento del equipo, de acuerdo a lo estipulado en el manual de los equipos; la frecuencia de ensayo entre  $10^4$  y  $10^6$  Hz; y la estabilidad de la temperatura entre 21 y 22°C para realizar la respectiva comparación con lo planteado por API 579.

Los tamaños de grieta se determinaron con el uso de un estereoscopio y se presentan en la tabla 3.10. Se puede notar que las dimensiones se encuentran bastante aproximadas; de esto se puede determinar cualitativamente que el ensayo se ha dado en condiciones de alineamiento del equipo. De otra manera, el crecimiento de la grieta hubiera variado considerablemente en los diferentes puntos del frente de grieta; asimismo, no hubiera cumplido con el requerimiento de no tener una variación de más de  $0.05B^{25}$  (1 mm). En la tabla 3.10 se puede observar que los 4 ensayos cumplen con este requerimiento.

<sup>24</sup> Provisto por Laboratorio de Materiales – PUCP.

<sup>25</sup> Revisar 3.2.8 *Medición óptica de la longitud de grieta*

**Tabla 3.12.** Mediciones de tamaño de grieta inicial y final

Ensayos	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Puntos	Real inicial (mm)	Real final (mm)	Real inicial (mm)	Real final (mm)	Real inicial (mm)	Real final (mm)
1	5.727	7.314	3.245	4.934	3.584	5.301
2	5.727	7.426	3.246	4.933	3.599	5.301
3	5.726	7.442	3.249	4.935	3.605	5.313
4	5.726	7.437	3.252	4.937	3.613	5.321
5	5.729	7.436	3.255	4.938	3.619	5.327
6	5.730	7.431	3.254	4.936	3.624	5.330
7	5.731	7.412	3.252	4.935	3.625	5.333
8	5.728	7.419	3.252	4.935	3.625	5.333
9	5.728	7.419	3.250	4.935	3.625	5.333
Promedio	5.728	7.415	3.251	4.936	3.613	5.321

Asimismo, debido a que se usa el método de la Curva de Resistencia, es necesario comparar la extensión de grieta,  $\Delta a_{predicted}$ , determinada mediante cálculos con  $\Delta a_p$ , extensión real de grieta. El rango admisible para la extensión de grieta es entre  $0.85\Delta a_p$  y  $1.15\Delta a_p$ , por tener grietas menores a  $0.2b_o$ . En la tabla 3.11 se muestran estos valores admisibles y si cumplen con este requerimiento de ASTM E 1820.

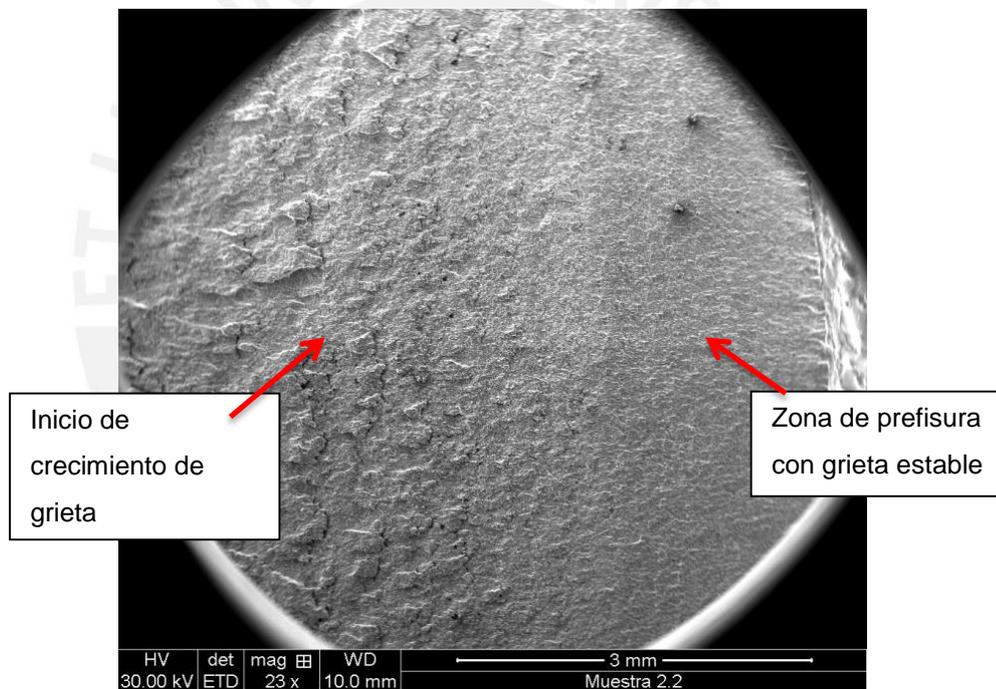
**Tabla 3.13** Comparación entre extensión de grieta calculada y grieta real

Características (mm)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Extensión esperada (calculada)	1.855	1.829	1.816
Extensión real (medida)	1.687	1.685	1.708
Mínimo admisible ( $0.85\Delta a_p$ )	1.434	1.432	1.452
Máximo admisible ( $1.15\Delta a_p$ )	1.940	1.938	1.9642
Verificación	Sí cumple	Sí cumple	Sí cumple

A partir, de esto, se puede validar que los tres valores resultantes son válidos de acuerdo a ASTM E 1820.

### 3.2.11 Fractografía de la fisura

Se realizaron también diferentes tomas fractográficas de los diferentes ensayos en el SEM con el fin de reconocer los diferentes estados de la probeta durante el ensayo de tenacidad.



**Figura 3.24** Acercamiento 23x (ETD)<sup>26</sup> en SEM de cara de grieta de Probeta 2

En la figura 3.23, se puede notar claramente las zonas que diferencian una etapa de otra. Siendo la primera parte, más homogénea, la zona generada por la pre fisura a altas frecuencias, la cual, conforme va aumentando su recorrido, va mostrando cierta inestabilidad en el crecimiento de grieta. La segunda parte, muestra la presencia de zonas grumosas generadas debido al excesivo esfuerzo al que la probeta es sometida a través de los ciclos R.

<sup>26</sup> ETD: *Electron-transfer Dissociation*.

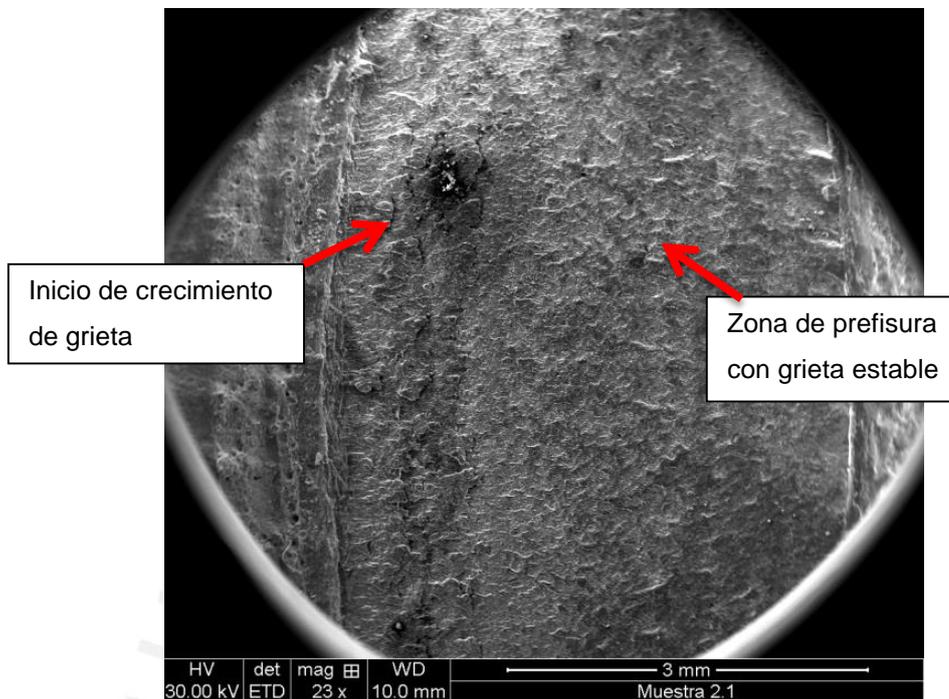


Figura 3.25 Acercamiento 23x (ETD) en SEM de cara de grieta de Probeta 3

En la figura 3.25, se puede notar que el inicio del crecimiento de grieta está precedido por una línea definida, esta línea es remarcada, a diferencia de la figura 3.24, debido a que la carga durante el ensayo de rotura debe haber sido muy alta, tal que la línea quedó remarcada dentro de la probeta.

### **3.3 Determinación de tenacidad a la fractura basado en ensayos de impacto Charpy**

Como se tiene en el punto 1.3.5, la norma API 579 menciona algunas fórmulas útiles para la determinación práctica de la tenacidad a la fractura,  $K_{IC}$ . Con los datos de la tabla 3.4 y las ecuaciones 7,8,9 y 10; se determina la tabla 3.7 para algunos valores superiores e inferiores dentro del rango que provee API 579.

**Tabla 3.14:** Valores determinados por API579

Descripción	Unidades	K <sub>IC</sub> 1	K <sub>IC</sub> 2	K <sub>IC</sub> 3	K <sub>IC</sub> Prom
1) Correlación para K <sub>IC</sub> de Rolfe-Novak Barsom (Ec. 7)	MPa $\sqrt{m}$	360.02	365.99	368.45	364.84
2) Estimado mínimo recomendado por WRC 265 (Ec. 8)	MPa $\sqrt{m}$	320.02	325.47	327.72	324.42
3) Correlación de tenacidad estática a la fractura de Sailors y Corton (Ec. 9)	MPa $\sqrt{m}$	298.25	303.10	305.10	302.16
4) Estimado mínimo para tenacidad estática de fractura recomendado en WRC 265 (Ec. 10)	MPa $\sqrt{m}$	379.11	386.90	390.12	385.39

De la tabla 3.14, se puede observar que todos los valores están cercanos a los valores determinados por los cálculos de la Integral J, determinados en los gráficos del punto 3.2.4. Estos resultados se cumplen para los últimos puntos de crecimiento de grieta en las curvas Integral J debido a que estos valores son determinados por la energía final absorbida por la probeta de Impacto Charpy después de la deformación final.

El gráfico 3.19 muestra el comportamiento final de las probetas de impacto Charpy. Se puede ver que ninguna de las probetas se rompe completamente debido a la alta tenacidad del material.



Figura 3.26. Deformación final de las probetas de ensayo de impacto Charpy

## CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron como resultado del cálculo de  $J$  diferentes valores en función del crecimiento de grieta; sin embargo, debido al procedimiento de validación de resultados, los valores finales para la tenacidad a la fractura (142 a 170  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ). Estos resultados se consideran confiables dentro del rango de estudio del estándar ASTM E 1820.
2. Se concluye que el comportamiento del material API 5L X65, es un comportamiento elasto plástico, común en los aceros tenaces. Esto queda demostrado debido al bajo crecimiento de grieta respecto al gran tamaño de la fuerza utilizada en los ensayos de rotura (0.2 mm vs. 29547 N).
3. Con los ensayos de tracción, impacto Charpy y análisis químico se puede concluir que la muestra evaluada del Laboratorio de Materiales cumple con las propiedades determinadas por el estándar API 5L para tuberías de clase X65 y nivel de especificación de producto, PSL 2. En relación al ensayo de metalografía, se han obtenido resultados de tamaño de grano mayor a 10 y se observó una microestructura ferrítico perlítica propia de los aceros con alta resistencia.
4. Los ensayos de impacto Charpy realizados a 0°C dan como resultado valores menores de energía absorbida respecto a los ensayos de 23°C, 42 J respecto a 410J, de lo cual se concluye el aumento de la fragilidad del material, conforme disminuye la temperatura.

5. Durante los ensayos 4 y 5, la grieta no se propagó como debería, formándose el *enromamiento de grieta* que imposibilitó el ensayo de rotura. Este enromamiento de grieta, estudiado por Wells, favoreció el endurecimiento por deformación que evitó el crecimiento de grieta a pesar que la apertura de la boca seguía creciendo.

6. Al comparar los resultados de API 579 con los cálculos de  $K_{JIC}$  provenientes de ASTM E 1820 se puede notar una relación de aproximadamente 2 a 1, teniéndose así a API 579 con un resultado de  $350 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  en promedio y, el resultado final con ASTM E 1820 es  $156 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Esto puede deberse a que el estudio realizado por API 579 abarca la energía absorbida en toda la zona deformada; sin embargo, la norma ASTM E 1820 solo considera como rango seguro la zona más cercana al inicio de deformación (crecimiento de grieta de 0.25mm).

## RECOMENDACIONES

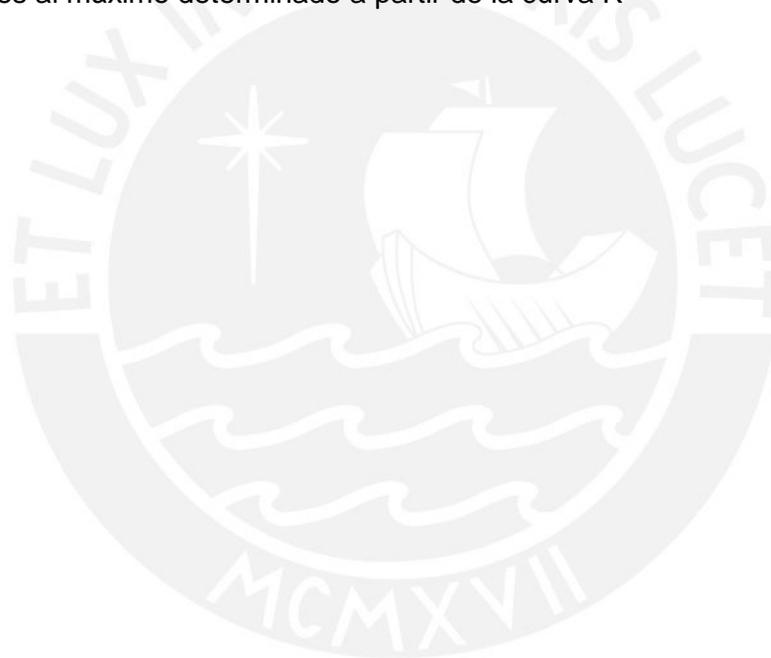
1. El trabajo realizado en el presente documento está basado en ASTM E 1820; sin embargo, esta norma no presenta algún detalle sobre el error final de determinación durante la experimentación causado por errores de medición propios de los equipos utilizados. Se recomienda para posteriores estudios la evaluación del error final de medición experimental de los parámetros de tenacidad a la fractura.

2. Así como el cálculo de la tenacidad a la fractura es útil para determinar factores de servicio más confiables, se debe tener en cuenta que el material, más allá del valor de  $J_{IC}$  puede tener una considerable reserva de tenacidad. Para ese caso de estudio, es más útil realizar un análisis de toda la curva R que proporciona mayor información acerca del crecimiento de grieta y no solo del valor más confiable.

3. Como parte del estudio de la tenacidad a la fractura, se ha propuesto desarrollar, basado en los resultados y recomendaciones obtenidas por Zwick, una guía con recomendaciones de ensayo que se incluye en el Anexo 4.1 del presente documento y

se entrega al Laboratorio de Materiales en su revisión 0. Este documento deberá servir de punto de partida para próximos estudios y revisiones que se vayan a hacer en temas relacionados a mecánica de la fractura.

4. Es importante reconocer que un especialista de la mecánica de Fractura debe tener en cuenta los efectos de la configuración y la influencia que puede tener sobre el análisis. Al determinar una curva R experimentalmente, la probeta se ensaya bajo parámetros de control de desplazamiento. Sin embargo, este tipo de comportamientos no se asemeja al trabajo en servicio, donde se es más probable a presentar inestabilidad en el crecimiento de grieta y los valores a tenacidad a la fractura pueden ser menores al máximo determinado a partir de la curva R



## BIBLIOGRAFIA

1. ARANA, José Luis y GONZÁLEZ, Javier Jesús.  
2002 *Mecánica de la Fractura*. Primera edición. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco
2. ANDERSON, T. L.  
2005 *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. Tercera edición. USA: Taylor & Francis Group
3. WELLS, A. A.  
1961 *Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture*. Proceedings of the Crack Propagation Symposium, Vol. 1, Paper 84. Cranfield, UK.
4. IRWIN, G.R.  
1961 *Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness*. Sagamore Research Conference Proceedings. Vol 4, pp 63-78.
5. DUGDALE, D.S.  
1960 *Yielding in Steel Sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 8, pp 100-104
6. THE WELDING INSTITUTE  
2013 *Are there any differences between fracture toughness carried out to BS 7448 and those using ASTM E 1820 or E1290?* Revisado el: 12.09.14  
<<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/structural-integrity-faqs/faq-are-there-any-differences-between-fracture-toughness-tests-carried-out-to-bs-7448-and-those-using-astm-e1820/>>
7. ZHU, Xian-Kui y JOYCE, James A.  
2012 *Review of fracture toughness (G,K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*. DigitalCommons. University of Nebraska-Lyncoln
8. JOYCE, James A  
1996 *Manual on Elastic-Plastic Fracture: Laboratory test Procedures*. American Society for Testing Materials.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS  
2013 E1823. *Standard Terminology relating to Fatigue and Fracture Testing*.
10. BROWN, W.F. Jr. y SRAWLEY, J.E.

1966 *Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials.*  
ASTM STP 410. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2010 *E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials.*

12. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2010 *E561. Standard Test Method for K-R Curve Determination*

13. AMERICAN PIPING INSTITUTE

2007 *API 579-1/ASME FFS-1. Fitness for Service.* Junio 2007.

14. AMERICAN PIPING INSTITUTE

2012 *API 5L. Specification for Pipe Line.* Diciembre 2012

15. VINICIUS, Ricardo, AIDAR, Cicero y SEIJO, Sergio

*Study of the mechanics fracture in API 5L X65 and X65 steel pipes.*  
Tenaris Confab

16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2013 *E1820. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*

17. KHARIN V. , TORIBIO J.

*Influence of fatigue pre-cracking on environmentally assisted fracture of high-strength Steel.* Department of Materials Engineering, University of Salamanca. España

18. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2008 *E415. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*

19. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2005 *A370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.*

20. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS.

2010 *E111. Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*

21. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2013 *E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.*

22. CAPELLE, J. FURTADO, J., AZARI. Z., JALLAIS. S., PLUVINAGE. G.  
2012 *Design based on ductile-brittle transition temperature for API 5L X65 steel used for dense CO2 transport.* Ecole Nationale d'Ingenierous de Metz et Université Paul Verlaine Metz. Francia.
23. AGUIRRE, I. y FERREIRA, I.  
2005 *Experimental and numerical analysis for SE(B) and SE(T) J-Integral Fracture Toughness testing.* 18<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering. Brasil.

