

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y
MATERIALES
VALPARAISO - CHILE**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**ESTUDIO DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr**

FELIPE ANTONIO GONZÁLEZ PORRAS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PRESENTADO EN
CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL
GRADO DE INGENIERO CIVIL METALURGICO**

**PROFESOR GUÍA:
DR. ING FLAVIO ANDRÉS DE BARBIERI BOERO**

**FECHA
Enero 2021**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la Universidad Técnica Federico Santa María por haber sido mi casa de estudio durante todos estos años.

Al departamento de ingeniería civil metalúrgica, desde Berni a todos los profesores, por haber sido parte de todo este proceso académico.

A ASMAR Valparaíso por ayudarme a llevar a cabo esta investigación.

A la USACH y en especial al profesor Monsalve por ayudarme desinteresadamente y facilitarme sus dependencias para llevar a cabo esta investigación.

A los apoyos académicos y auxiliares de la UTFSM, por tener siempre buena disposición para ayudarme, en especial a Juan Verdejo y don Galvarino por su ayuda, apoyo, gratas conversaciones y consejos durante todo este proceso.

Al profesor Juan Donoso, por enseñarme y traspasarme la pasión por el lado más “detectivesco” de la metalurgia, por las infaltables conversaciones de fútbol y política, y también por su constante apoyo, disponibilidad, interés y consejos para ayudarme durante esta investigación.

A mi profesor guía, en primer lugar, por confiarme este tremendo desafío que implica llevar a cabo esta investigación, por inculcarme la disciplina y actitud que se debe tener tanto en los ámbitos profesionales como personales de la vida, por siempre estar disponible para enseñarme y responder mis inquietudes, también agradecerle por las conversaciones, viajes, reuniones.. en definitiva, por su constante apoyo académico y personal, muchas gracias profesor Flavio.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

DEDICATORIA

A mi familia y amigos, gracias por todo.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

RESUMEN

Los aceros TWIP poseen una alta resistencia mecánica y una elevada ductilidad, dos propiedades que no siempre vienen de la mano, esto ha implicado que estos aceros han tenido una importante notoriedad en los últimos años, que los ha transformado en uno de los materiales preferidos en la industria automotriz y también en un material de estudio para otras industrias.

En esta memoria se tiene como objetivo estudiar la tenacidad a la fractura de dos composiciones distintas de estos aceros: Fe22Mn0.6C0Cr y Fe22Mn0.6C5Cr. Para llevar a cabo este estudio se formularon 4 objetivos, los cuales permitieron determinar algunas conclusiones relevantes para posteriores estudios de investigación y un mayor conocimiento del comportamiento de este material.

Se realizó una caracterización química y microestructural del acero a través de medición de tamaño de grano, metalografías, espectrometría y determinación de energía de falla de apilamiento a través de un modelo.

Posteriormente se realizaron ensayos de tracción a temperatura ambiente y 100, 200, 250, 300, 350 y 400°C, con lo cual se pudo determinar el efecto del cromo en algunas propiedades mecánicas y también en los mecanismos de endurecimiento del material a distintas temperaturas.

Finalmente se realizaron 10 ensayos de fractura, de acuerdo a la norma ASTM E1820, y a través de dos métodos se pudo determinar el valor J1C del material y la curva de resistencia, también la energía al impacto y relacionarlos con el porcentaje de cromo.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

ABSTRACT

The TWIP steels have a high mechanical resistance and high ductility, two properties that do not always are together, that means that those steels have had an important notoriety in recent years, which has transformed them into one of the preferred materials in the automotive industry and also as a material's studies for other industries.

The objective of this investigation, is study the fracture toughness of two different compositions of these steels: Fe22Mn0.6C0Cr and Fe22Mn0.6C5Cr. To carry out this study, 4 objectives were formulated, which allowed to determine some relevant conclusions for subsequent research studies and a greater knowledge of the behavior of this material.

A chemical and microstructural characterization of the steel was done through grain size measurement, metallography, spectrometry and determination of stacking fault energy through a model.

Subsequently, tensile tests were done at room temperature and 100, 200, 250, 300, 350 and 400 ° C, with which was possible to determine the effect of chromium on some mechanical properties and also on the hardening mechanisms of the material at different temperatures.

Finally, 10 fracture tests were done, according to the ASTM E1820 standard, and through two methods was possible to determine the J1C value of the material and the resistance's curve, as well as the impact energy and relate them to the percentage of chromium.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIA.....	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL	10
1.1 Introducción general.....	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES TEÓRICOS	13
2.1 Aceros TWIP.....	13
2.1.1 Elementos aleantes en aceros TWIP.....	14
2.2 Fenómenos asociados	16
2.2.1 Energía falla de apilamiento	16
2.2.2 Mecanismos de endurecimiento.....	18
2.2.1.1 Maclado mecánico	18
2.2.1.2 Efecto dinámico de Hall-Petch	19
2.2.1.3 Envejecimiento por deformación dinámica (DSA)	20
2.2.1.4 Deslizamiento de dislocaciones	21
2.2.1.4.1 Modos de deslizamiento	22
2.2.1.4.1 Deslizamiento cruzado.....	23
2.3 Tenacidad a la fractura	23
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
3.1 Obtención del lingote	25
3.1.1 Fusión y lingoteado.....	25
3.1.2 Forjado	26
3.2 Diseño de Probetas.....	27
3.2.1 Probetas de tracción.....	27

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}CxCr

3.2.2	Probetas de fractura	27
3.3	Metodología experimental.....	28
3.3.1	Ensayo de tracción	28
3.3.2	Ensayo de fractura.....	29
3.3.3	Descripción de equipos	31
3.3.3.1	Máquina de tracción.....	31
3.3.3.2	Máquina de fatiga.....	31
3.3.4	Montaje de muestras para metalografías	32
3.3.5	Lijado y pulido.....	32
3.3.6	Ataque químico.....	34
3.3.7	Metalografía.....	34
CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
4.1	Caracterizar el acero química y microestructuralmente (Objetivo N°1) ...	35
4.2	Analizar las propiedades mecánicas y correlacionarlas con el porcentaje de cromo y con los mecanismos de deformación (Objetivo N°2).....	36
4.2.1	Propiedades mecánicas	36
4.2.1.1	Ensayo de tracción a temperatura ambiente.....	36
4.2.1.2	Ensayos de tracción a distintas temperaturas.....	37
4.3	Obtener el valor del parámetro J _{1c} y relacionarlo con el porcentaje de cromo (Objetivo N°3).	46
4.3.1	Método básico Aleación Fe ₂₂ Mn _{0.6} C ₅ Cr.	46
4.3.2	Método normalización aleación Fe ₂₂ Mn _{0.6} C ₅ Cr.	56
4.3.3	Aleación Fe _{0.6} C ₂₂ Mn	63
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES	65
CAPÍTULO 6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	67
CAPÍTULO 7	ANEXOS	69
7.1	Cálculos para parámetros de prefisuración.....	69
7.2	Cálculo energía falla de apilamiento	70
7.3	Cálculos Tenacidad a la fractura.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1 Relación entre elongación y esfuerzo de fluencia [2]	11
Figura 2.1.1 Capacidad de absorber energía en aceros utilizados en la industria automotriz [3].....	14
Figura 2.1.2 Influencia de los elementos aleantes en la EFA en un Fe ₂₂ Mn _{0.6} C [5].	16
Figura 2.2.1 Efectos de la composición y temperatura en EFA y modos de endurecimiento por deformación [7].	17
Figura 2.2.2 Esquema falla de apilamiento.	17
Figura 2.2.3 Esquema maclado mecánico por movimiento de átomos [10].	19
Figura 2.2.4 Efecto dinámico de Hall Petch [3].....	20
Figura 2.2.5 Curva esfuerzo deformación con flujo discontinuo [12].	21
Figura 2.2.6 Esquema clásico sobre el deslizamiento [14].....	21
Figura 3.2.1 Probeta ensayo de tracción.....	27
Figura 3.2.2 Probeta Ensayo de fractura.....	28
Figura 3.2.3 Dimensiones Probeta de Fractura.....	28
Figura 3.3.1 Ensayo de tracción.....	29
Figura 3.3.2 Esquema fisura probeta.	30
Figura 3.3.3 Programa fisura de probeta.....	30
Figura 3.3.4 Máquina de tracción	31
Figura 3.3.5 Máquina de fatiga.....	32
Figura 3.3.6 Equipo de lijado y pulido.	33
Figura 4.1.1 Metalografías a temperatura ambiente, post ensayo de tracción.	36
Figura 4.2.1 Metalografías a distintas temperaturas, aumento 200x.....	41
Figura 4.2.2 Curva esfuerzo deformación Fe ₂₂ Mn _{0.6} C, a distintas temperaturas	42
Figura 4.2.3 Curvas esfuerzo deformación Fe ₂₂ Mn _{0.6} C ₅ Cr, a distintas temperaturas.	44
Figura 4.3.1 Curva carga desplazamiento.....	47
Figura 4.3.2 Curva carga desplazamiento, probeta 1.....	48
Figura 4.3.3 Curva carga desplazamiento, probeta 2.....	48
Figura 4.3.4 Curva carga desplazamiento, probeta 3.....	49
Figura 4.3.5 Curva carga desplazamiento, probeta 4.....	49
Figura 4.3.6 Curva carga desplazamiento, probeta 5.....	50
Figura 4.3.7 Curva carga desplazamiento, probeta 6.....	50
Figura 4.3.8 Curva carga desplazamiento, probeta 7.....	51
Figura 4.3.9 Curva J-Da	52
Figura 4.3.10 Curva J-Da, líneas de construcción para calificar la data.....	53
Figura 4.3.11 Curva J-Da, con regresión lineal.	54
Figura 4.3.12 Curva J-Da, región de zona calificada.....	55
Figura 4.3.13 Curva carga desplazamiento, normalización.....	56
Figura 4.3.14 Recta Tangente de punto final a curva normalización.....	57

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Figura 4.3.15 Ajuste de función de normalización con la curva normalizada y el punto final.....	58
Figura 4.3.16 Ajuste de función de normalización con data ajustada con nuevo tamaño de grieta.	59
Figura 4.3.17 Curva J-Da, método normalización.	60
Figura 4.3.18 Curva J-Da con líneas de construcción.....	60
Figura 4.3.19 Curva J-Da, con regresión lineal.	61
Figura 4.3.20 Curva J-Da, zona región de data calificada.....	61
Figura 4.3.21 Curva J-Da, normalización y método básico.	62
Figura 4.3.22 Curva J-Da, experimental y key curve.....	63
Figura 7.3.1 Áreas bajo curvas de cada probeta.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.1 Efecto de los elementos aleantes en las propiedades de los aceros TWIP [2].	15
Tabla 3.2.3.1 Respuestas y técnica experimental para cumplimientos de objetivos 25	
Tabla 4.1.1 Energía falla de apilamiento a temperatura ambiente	35
Tabla 4.2.1 Resultados ensayos de tracción a temperatura ambiente.....	37
Tabla 4.2.2 Energía de falla de apilamiento a partir de cálculo teórico a distintas temperaturas.	38
Tabla 4.2.3 Resultados ensayo de tracción a distintas temperaturas con 5% de Cr	38
Tabla 4.2.4 Resultados ensayos de tracción a distintas temperaturas sin Cr [20].	39
Tabla 7.2.1 Composición química de aleaciones estudiadas.	71
Tabla 7.2.2 Parámetros utilizados para el cálculo teórico de la energía de falla de apilamiento.	72
Tabla 7.3.1 Valores de Jel.....	74
Tabla 7.3.2 Valores de J, para las distintas probetas.....	77

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción general

Los aceros TWIP fueron patentados a mediados de la década de los 90, pero para llegar hasta este punto hubo una serie de descubrimientos e investigaciones, comenzando todo desde el año 1888, cuando fueron desarrollados los aceros con alto contenido de manganeso, conocidos como los aceros Hadfield. A continuación, otro hito relevante ocurrió en el año 1929 cuando Hall y Krivobok fueron los primeros en caracterizar la microestructura de los aceros Hadfield, obteniendo una microestructura 100% austenítica. A partir del año 1950 se observó el gran endurecimiento por deformación de estos aceros, sin la presencia de transformación de fase, pero sí con la ocurrencia de maclado mecánico. Ya en el transcurso de la década de los 70's comenzó el interés por estas aleaciones y se fueron haciendo pruebas con distintas composiciones, disminuyendo el porcentaje de carbono y aumentando el porcentaje de manganeso, y así fue como en 1990 se obtuvo la primera composición de un acero TWIP Fe-25mN-1.5Al-0.5C-0.1N [1].

Actualmente, los aceros TWIP son uno de los materiales más atractivos para la industria automotriz, esto debido a su excelente combinación en resistencia mecánica y ductilidad [2]. Como se puede observar en la figura 1.1.1.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}CxCr

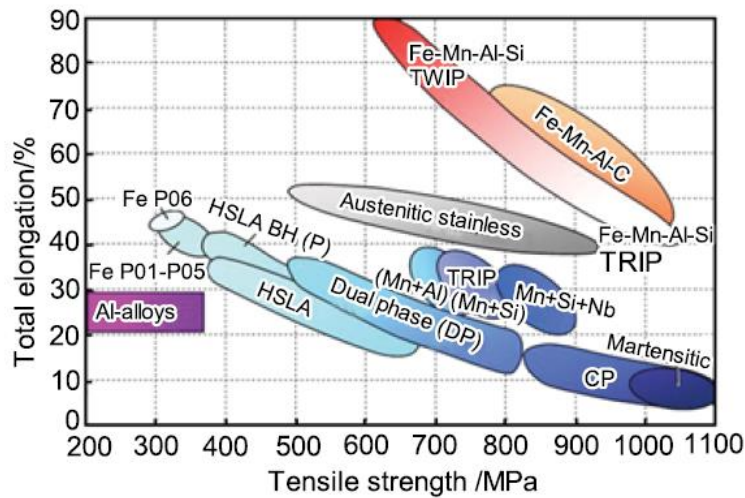


Figura 1.1.1 Relación entre elongación y esfuerzo de fluencia [2]

Estos aceros, se caracterizan por poseer matriz austenítica, una alta deformación total (60-95%), un alto esfuerzo a la tracción máxima (UTS: 800-1100 [MPa]) y una excelente conformabilidad. Lo anterior, se debe principalmente a la formación de maclas durante la deformación plástica, las cuales actúan como barreras al deslizamiento de dislocaciones, efecto denominado como Hall Petch dinámico [1]. Las maclas mecánicas mencionadas anteriormente se producen únicamente cuando la Energía de Falla de Apilamiento (EFA) se sitúa entre 15 y 50 [mJ/m²] aproximadamente. Para valores inferiores a los ya expresados, se produce la transformación de austenita en martensita epsilon típica de los aceros TRIP. Mientras que si la energía de falla de apilamiento es superior a los 50 [mJ/m²], el único mecanismo operante es el deslizamiento de dislocaciones [3].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar el efecto del cromo en el maclado mecánico y como afecta esto en el comportamiento de la tenacidad a la fractura de un acero TWIP Fe-0.6C-22Mn-xCr.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el acero química y microestructuralmente.
- Analizar las propiedades mecánicas y correlacionarlas con el porcentaje de cromo y con los mecanismos de deformación.
- Obtener el valor del parámetro J_{1c} y relacionarlo con el porcentaje de cromo.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Aceros TWIP

En la actualidad las distintas industrias se ven en la necesidad de la utilización de materiales que cumplan con requisitos mucho más exigentes que años atrás, esto visto desde el punto de vista de diseños, consumo, costos, corrosión, ambientales, calidad, seguridad, entre otros. Específicamente se han realizado muchos esfuerzos en materiales de ingeniería que sean más eficientes energéticamente, pero sin sacrificar seguridad y propiedades del material.

Los aceros TWIP son un material que cumple con estos nuevos requerimientos, ya que poseen una excelente combinación de alta resistencia y ductilidad en comparación a los aceros convencionales, llegando a alcanzar elongaciones de un 90%, UTS 1500 MPa y tenacidad al impacto de 90 hasta 120 J/cm². Además de esta superioridad en propiedades mecánicas los aceros TWIP poseen una densidad relativa menor y una considerablemente mayor capacidad de absorción de energía por impacto [4], los que lo hacen atractivo para aplicaciones que requieran ser energéticamente eficientes.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

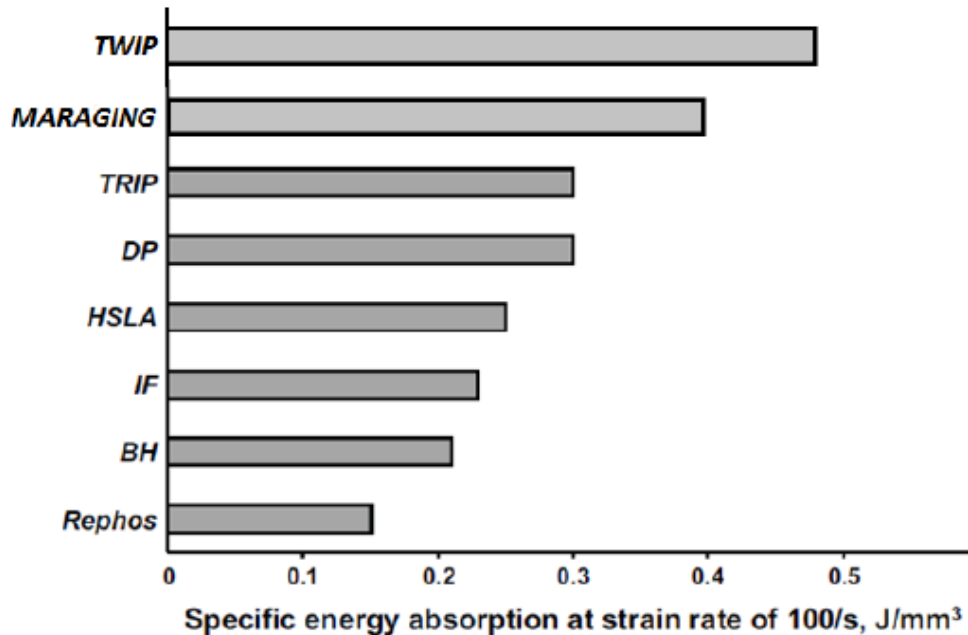


Figura 2.1.1 Capacidad de absorber energía en aceros utilizados en la industria automotriz [3].

Los aceros TWIP, al igual que los aceros austeníticos tienen una estructura cristalina FCC, en este caso con un porcentaje de manganeso superior al 20%. Son compuestos por una única fase, que es la austenita y pueden estar en condición aleado con distintos elementos aleantes. [2]

2.1.1 Elementos aleantes en aceros TWIP

Los elementos aleantes juegan un rol bastante importante en las propiedades de los aceros TWIP, ya que influyen directamente en la energía de falla de apilamiento, tema que es abordado más adelante en esta investigación.

Existen distintas variaciones de composición en los aceros TWIP, pero se tiene que el carbono no debe ser menor al 0,05% ni superior al 1%, normalmente se encuentra en el rango entre 0,5 a 1%. Cumple el rol de mejorar la estabilidad de la austenita y aumentar la resistencia del acero, también inhibe la formación de martensita épsilon, aumentando la energía de falla de apilamiento [2].

Por otra parte, para asegurar una microestructura austenítica a temperatura ambiente, el manganeso juega un rol fundamental para estabilizar dicha fase. Si el

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

contenido de manganeso es inferior al 15% en peso, podría formarse α' -martensita y por el contrario si supera el 30-32% en peso, podría formarse una fase frágil β -Mn en la microestructura. Es así como se recomiendan contenidos de manganeso en el orden de 15-30% en peso [2].

Otros elementos como carbono, silicio y/o aluminio son también necesarios para obtener alta resistencia mecánica y ductilidad. Para otros propósitos como, por ejemplo: mejorar la resistencia a la corrosión, la adición de cromo es recomendada [2]. La

nos muestra a grandes rasgos el efecto de diversos elementos aleantes en las propiedades de los aceros TWIP.

Tabla 2.1.1 Efecto de los elementos aleantes en las propiedades de los aceros TWIP [2].

Efecto	C	Mn	Si	B	Ti	N	Al
Estabilizador fase γ	√	√				√	√
Fortalecimiento de austenita por solución sólida	√		√			√	√
Refinamiento martensita ξ			√				√
Ductilidad en caliente				√	√		

Finalmente, la figura 2.1.1 nos señala la influencia de diversos elementos aleantes como Cu, Si, Al y Cr en la energía de falla de apilamiento. Debemos recordar que el acero a estudiar presenta dos composiciones diferentes (con 0% y 5% de cromo), por lo que todo análisis realizado será con respecto a ellos. En la figura se aprecia que el porcentaje de Cr disminuye la energía de falla de apilamiento de forma lineal, por lo que se espera que contenidos de 5% cromo presenten menor energía de falla de apilamiento que los de 0% cromo.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}CxCr

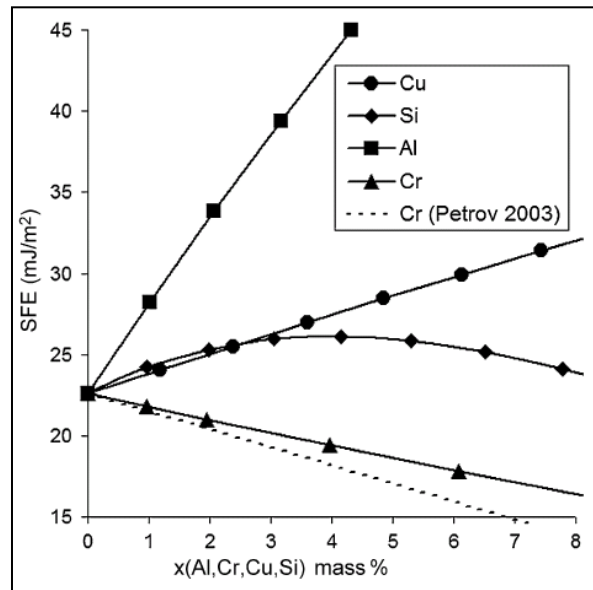


Figura 2.1.2 Influencia de los elementos aleantes en la EFA en un Fe₂₂Mn_{0.6}C [5].

2.2 Fenómenos asociados

2.2.1 Energía falla de apilamiento

Como ya se ha mencionado anteriormente los aceros TWIP cuentan con un gran balance entre su resistencia mecánica y ductilidad, y esto se debe principalmente a su capacidad de endurecimiento por deformación. En estos aceros se pueden observar la presencia de cuatro tipos de mecanismos de endurecimiento por deformación: el maclado mecánico, la transformación de fases como martensita ϵ o α , el envejecimiento por deformación dinámica y el deslizamiento de dislocaciones. La intensidad con la que se presentan estos fenómenos depende de la composición química, la temperatura en la que ocurre la deformación y en menor medida del tamaño de grano [6]. La energía de falla de apilamiento está muy relacionada con los modos en los que ocurre el endurecimiento por deformación de los aceros austeníticos, y a su vez como se puede observar en la figura 2.2.1 la composición química y la temperatura son los parámetros que controlan la energía de falla de apilamiento. Si los valores de la energía de falla de apilamiento son

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

menores a 15 mJ/mm^2 ocurre la transformación martensítica, a valores más altos se suprime esta transformación y ocurre el maclado mecánico, hasta los 50 mJ/mm^2 .

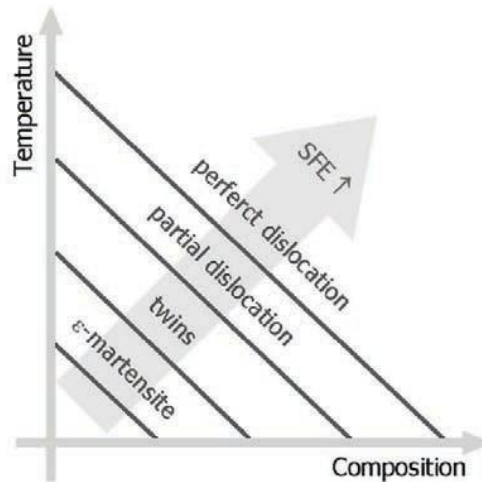


Figura 2.2.1 Efectos de la composición y temperatura en EFA y modos de endurecimiento por deformación [7].

Las fallas de apilamiento que ocurren en las estructuras FCC representan un error de la secuencia de apilamiento de planos compactos. Una red FCC produce una secuencia de apilamiento ABCABCABC, pero suponga que se produce la secuencia ABCABABCABC en esta porción de la secuencia el plano tipo A aparece donde debería estar localizado un plano tipo C, es por eso que esta pequeña región que tiene una secuencia de apilamiento hcp, representa una falla de apilamiento [8].

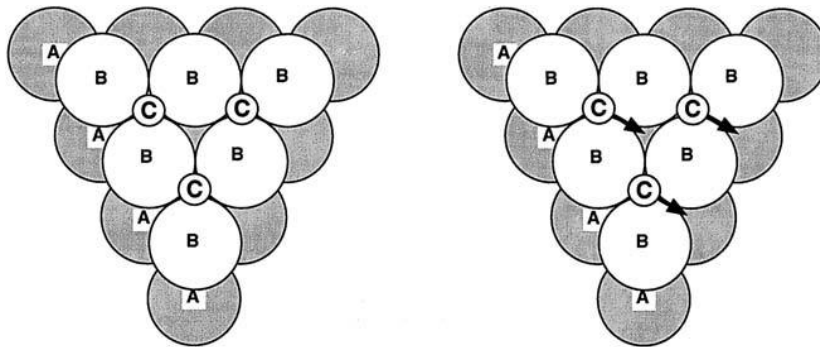


Figura 2.2.2 Esquema falla de apilamiento.

Esta falla de apilamiento se genera debido a la disociación de una dislocación perfecta en dos parciales, debido a que este deslizamiento es más favorable energéticamente.

La energía de falla de apilamiento es la energía por área de falla y puede considerarse como una tensión superficial que atrae a dos dislocaciones parciales, además considerando la repulsión mutua de ambas dislocaciones, se tiene que esta diferencia es el valor de la energía de falla de apilamiento. [9]

2.2.2 Mecanismos de endurecimiento

Como ya se ha mencionado anteriormente la excelente relación entre resistencia mecánica y ductilidad de los aceros TWIP, puede encontrar su principal explicación en su capacidad de endurecimiento por deformación, a continuación, se explica que mecanismos de endurecimiento se presentan en estos aceros.

2.2.1.1 Maclado mecánico

El maclado mecánico es un modo de deformación plástica, que ocurre al aplicar un determinado esfuerzo cortante que produce que la estructura original del cristal cambie y tenga una nueva orientación. Una buena forma de describir el maclado mecánico es a través de la siguiente figura.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

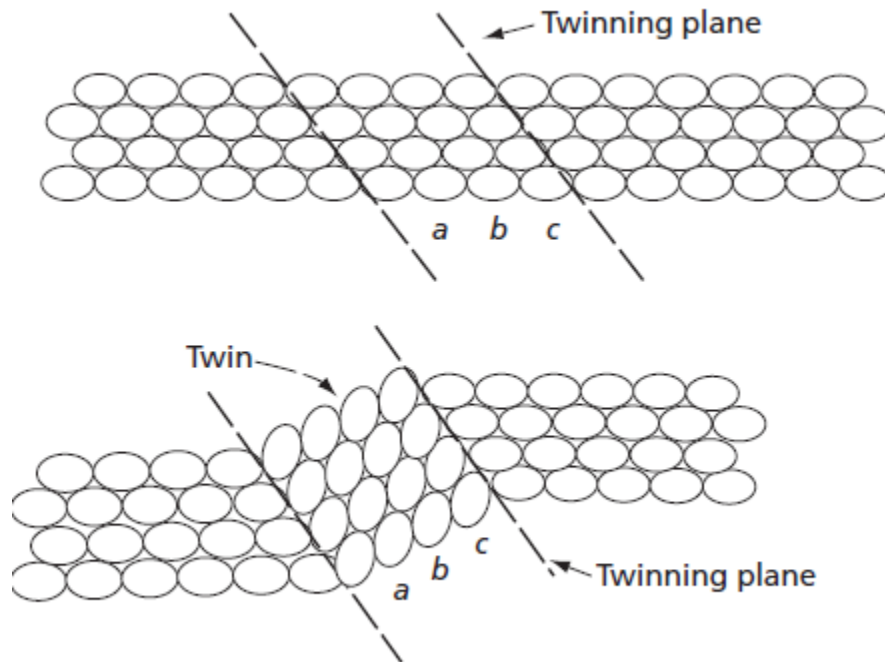


Figura 2.2.3 Esquema maclado mecánico por movimiento de átomos [10].

En la parte superior de la figura se observa el arreglo atómico sin una fuerza cortante aplicada, mientras que en la parte inferior se observa el mismo arreglo atómico, pero luego de haber aplicado la fuerza cortante. La macla se forma por el movimiento de átomos (a,b,c) a un eje que es perpendicular al plano de la hoja, se puede notar que la macla es una imagen especular del arreglo atómico original. Al producirse un cambio de orientación en el arreglo atómico existen pruebas que el borde de la macla actúa como un borde de grano, por lo que la macla puede ser considerado un afinador de grano. [10]

2.2.1.2 Efecto dinámico de Hall-Petch

Como se mencionó anteriormente, el maclado mecánico puede considerarse como un modo de deformación capaz de afinar el grano de un material, el endurecimiento por afinamiento de tamaño de grano se explica en que los bordes de grano actúan como una barrera para el movimiento libre de las dislocaciones, de esta manera se

aumenta la densidad de dislocaciones en estas zonas, aumentando la fuerza de repulsión entre ellas. El fenómeno que se presenta en los aceros TWIP relacionado con este tema es el efecto dinámico de Hall-Petch, el cual consiste en que, al aumentar la deformación plástica en el material, se va produciendo mayor cantidad de maclas mecánicas que van subdividiendo los granos austeníticos, generando así una mayor obstaculización al deslizamiento de dislocaciones.

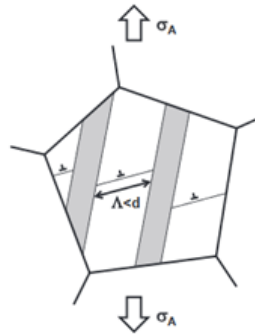


Figura 2.2.4 Efecto dinámico de Hall Petch [3].

2.2.1.3 Envejecimiento por deformación dinámica (DSA)

Es de conocimiento que existen básicamente dos tipos de fenómenos de envejecimiento del material. En primer lugar, tenemos el envejecimiento por deformación estática, el cual se produce cuando el material ha experimentado deformación plástica y posteriormente se ha sometido a un envejecimiento por un periodo de tiempo determinado. El fenómeno de endurecimiento que se produce es producto de la difusión de los átomos solutos hacia las dislocaciones a medida que transcurre el tiempo, los solutos forman unas verdaderas atmósferas, llamadas “Atmósferas de Lomer-Cottrell” que impiden el proceso de deslizamiento de las dislocaciones. En segundo lugar, también existe el caso del envejecimiento por deformación dinámica, en este caso el envejecimiento ocurre durante la deformación y el fenómeno que sucede que es los átomos solutos (dipolo Mn-C) poseen una mayor movilidad que las dislocaciones, por lo que las obstaculizan durante su deslizamiento. Las dislocaciones se bloquean y desbloquean

dependiendo del esfuerzo que este siendo aplicado durante la deformación, y este efecto se manifiesta en la curva esfuerzo-deformación como un flujo discontinuo, que se conoce como el efecto de Portevin - Le Chatelier. [11] [12]

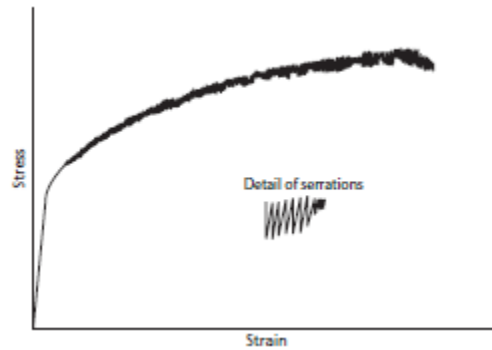


Figura 2.2.5 Curva esfuerzo deformación con flujo discontinuo [12].

2.2.1.4 Deslizamiento de dislocaciones

Las dislocaciones son defectos lineales de la red, responsables de casi todos los aspectos de la deformación plástica de los metales [13]. El deslizamiento de ellas ocurre cuando la tensión cizallante (CRSS, Critical Resolved Shear Stress) sobrepasa un valor crítico. La figura 2.2.6 ilustra una imagen clásica del deslizamiento.

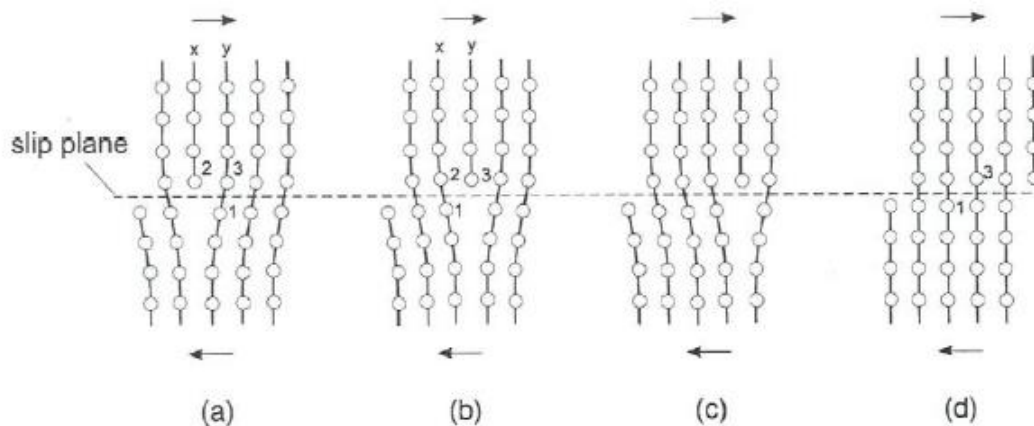


Figura 2.2.6 Esquema clásico sobre el deslizamiento [14].

Generalmente el plano de deslizamiento es el de mayor densidad atómica y la dirección de deslizamiento es la más compacta dentro de dicho plano, en el caso de estructuras cristalinas FCC corresponde a la familia de planos $\{111\}$. Un plano y una dirección de deslizamiento constituyen un sistema de deslizamiento.

El vector de la red cristalina que indica la dirección y magnitud del desplazamiento que sufren los átomos de la red con el paso de una dislocación, recibe el nombre de Vector de Burgers.

En una dislocación ideal, el vector de Burgers siempre tiene como módulo el parámetro de red.

2.2.1.4.1 Modos de deslizamiento

Existen dos formas principales en las que una dislocación o un grupo de dislocaciones pueden moverse en un cristal: Deslizamiento planar y Deslizamiento cruzado.

2.2.1.4.1.0 Deslizamiento planar

Las dislocaciones permanecen en el plano en el que fueron formadas. Bajo circunstancias normales, es probable que una dislocación encuentre obstáculos en su camino que la obliguen a cambiar de plano de deslizamiento y es muy común que esto ocurra, de manera que para que se dé el deslizamiento planar es necesario que las dislocaciones no tengan la capacidad de deslizarse en forma cruzada, es decir, de cambiar de plano de deslizamiento. Esta situación se da principalmente en dislocaciones parciales [15].

Las dislocaciones parciales se presentan principalmente en cristales FCC, debido a que en éstos el movimiento de una dislocación es energéticamente más favorable yendo en una secuencia de dos posiciones parciales, en lugar de cruzar en una dirección.

2.2.1.4.1 Deslizamiento cruzado

Cuando la Energía de Falla de Apilamiento es alta, como en los metales puros, las dislocaciones parciales no se forman y las dislocaciones pueden cambiar de un plano a otro, siempre y cuando el vector de Burgers sea compatible con ambos planos. El paso de una dislocación de un plano a otro se le llama deslizamiento cruzado.

El deslizamiento cruzado permite que las dislocaciones se muevan con mayor libertad que en el deslizamiento planar, formando arreglos complejos que evolucionan a medida que aumenta la densidad de dislocaciones [15].

2.3 Tenacidad a la fractura

Hoy en día con el desarrollo tecnológico alcanzado, ya sea por la aparición de nuevos materiales o las condiciones de distintas operaciones cada vez más extremas, es que se hace necesario conocer en detalle el comportamiento que tiene cada material. Considerando esto es que nace la rama de la mecánica de fractura que estudia el comportamiento de los cuerpos que presentan grietas, entallas o defectos. Existen procedimientos experimentales que aplican los conceptos de la mecánica de fractura y describen la tenacidad de la fractura a través del parámetro J_{1c} y la curva J-R. Esta propiedad tiene relación con la falla de los materiales, y se ha estudiado su importancia en áreas como el desgaste por impacto y abrasión, concluyendo que a mayor tenacidad de fractura se encuentra una mejor resistencia al impacto y a la abrasión [16].

Normalmente, la resistencia a la fractura en los aceros con alto porcentaje de manganeso es estudiada a partir de ensayos Charpy [17], debido a la conveniencia de aplicar este ensayo, en esta investigación se hizo mediante los conceptos de mecánica de fractura y a partir de estos también se obtuvo resultados de un ensayo Charpy. Existen tres métodos en la norma E1820 de ASTM, para establecer el valor de J_{1c} y la curva J-R, que son los siguientes: método básico, método de descargas parciales y la normalización. En esta investigación se realizó el método básico, más costoso y mayor requerimiento de material, y el método de normalización que

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

requiera el uso de tan solo una probeta, se espera comparar sus resultados, los detalles experimentales de estos métodos serán explicados más adelante.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la descripción de la metodología utilizada para la fabricación del acero TWIP Fe-0.6C-22Mn-5Cr y también para el cumplimiento de los objetivos. En la siguiente tabla se muestra las respuestas y metodología experimental utilizadas para el cumplimiento de objetivos de esta investigación.

Tabla 3.2.3.1 Respuestas y técnica experimental para cumplimientos de objetivos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VARIABLE	RESPUESTA	TÉCNICA EXPERIMENTAL
1	Cantidad de Cr	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño de grano. - Fases presentes. - EFA 	<ul style="list-style-type: none"> - Espectometría. - M.O(ASTM E112). - Modelo teórico.
2	Cantidad de Cr	<ul style="list-style-type: none"> - Propiedades mecánicas (fluencia, UTS, ductilidad tenacidad, energía de impacto, dureza). 	<ul style="list-style-type: none"> -Ensayo de tracción (ASTM E8). - Dureza - Impacto
3	Cantidad de Cr	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener valor J_{1c} 	<ul style="list-style-type: none"> - Ensayo fractura (ASTM E1820)

3.1 Obtención del lingote

3.1.1 Fusión y lingoteado

La fusión se llevó a cabo en un horno de inducción abierto marca Power-Trak en el laboratorio de fundición del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago. Se obtiene un lingote de masa 30 [Kg] usando: chatarra de acero para el aporte con 0.1% Si, 0.1%Mn y 0.1% de C, carburante o coque para el C faltante, Fe-Mn con 1.5% C 0.1% Si y 8% Mn, Fe-Si (70-75% Si) y 0,3% C, Fe-Cr (70-75% Cr), P y S máximo de 0,03%.

Se procede a cargar el horno de inducción, primero se realizó la carga de chatarra de acero, a medida que se funde ésta se adiciona el Fe-Si con el fin de desoxidar el metal. A continuación, se agrega Fe-Cr del cual se pierde cerca de un 1% en desoxidar y formar CrO₂. Una vez fundida toda la chatarra se adicionó Fe-Mn,

terminando así el total de la carga. La justificación de esta secuencia es evitar la formación de óxidos de Mn o Cr. Finalmente, se adicionó polvos atrapa escoria, que para este caso fue óxido de sílice.

Posteriormente, al tener el baño libre de escorias se toma una muestra con el fin de analizar la composición química y verificar que esta corresponda a la esperada. Se ajusta levemente la composición y se repite el procedimiento.

Se trasvasija el metal a una cuchara, que es utilizada para colar al molde de arena, se utilizó arena de sílice con un contenido en peso de 1,5% de resina fenólica, la cual a su vez posee 2,5% de catalizador. Posteriormente, se agrega una capa de cromita aplicada con pintura de zircón con el fin de evitar la sinterización de la arena de sílice producto de la alta temperatura. Cabe destacar que previo a la colada, el molde y la cuchara son flameados con la ayuda de mecheros para asegurar la eliminación de humedad existente y disminuir el choque térmico que puede causar problemas en la colada.

Finalmente, para garantizar que el rechupe sea mínimo al momento de la solidificación, se adicionan polvos exotérmicos, los cuales a base de aluminio aumentan la temperatura del metal a solidificar, ayudando a que no se contraiga demasiado.

3.1.2 Forjado

El lingote obtenido a través del proceso de fundición posee una masa aproximada de 25 [Kg] y sus dimensiones correspondientes son 100x100x320 [mm]. Luego el lingote es forjado con un martinete hidráulico a una temperatura de 1100 [°C], pertenencia de la empresa ASMAR (Talcahuano).

Las dimensiones de la palanquilla obtenida a través del proceso de forjado fueron de 22 [mm] de espesor, 140 [mm] de ancho y 1000 [mm] de largo.

Las ventajas de realizar un forjado en el proceso de fabricación de la aleación principalmente apuntan a tener una estructura homogénea de granos equiaxiales, mayor resistencia mecánica y un menor tamaño de grano en comparación al acero en estado fundido.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

La palanquilla forjada es maquinada para obtener un set de muestra de 17 [mm] de espesor, 51 [mm] de ancho y 138 [mm] de largo.

En la cara frontal superior se realiza un biselado respecto del sentido de la laminación para favorecer el agarre de los rodillos. Además, se hace una perforación en la cara posterior de aproximadamente 2,5 [mm] de diámetro con la finalidad de introducir una termocupla tipo k que es conectada a una interfase marca “Personal Daq/50 series fabricada por IOtech”, la cual a través de un puerto USB registra en un computador los valores de temperatura generados al interior de la planchuela.

El tratamiento termomecánico de homogeneización se realiza en un horno de resistencia marca Lindbergh a una temperatura de 1150 [°C] durante 30 minutos. El control del horno es del tipo proporcional-integral-derivativo (PID), con una oscilación de temperatura en el rango de 5 [°C]. Posteriormente, se procede a laminar el material en sucesivas pasadas en un laminador marca Joliot, hasta alcanzar un espesor de material de 15 [mm], procurando que la temperatura de la muestra no descienda de los 900 [°C]. El control de la temperatura se realiza mediante pirómetro láser y la termocupla tipo k inserta en el material. Una vez que se alcanza el espesor deseado, se temple a 300 [°C] en un baño de sales.

3.2 Diseño de Probetas

3.2.1 Probetas de tracción

Las probetas de tracción utilizadas fueron diseñadas en base a la norma ASTM E8, el diámetro corresponde a 4[mm] y el largo útil de 20 [mm]. Estas probetas fueron confeccionadas en ASMAR Valparaíso.



Figura 3.2.1 Probeta ensayo de tracción.

3.2.2 Probetas de fractura

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Las probetas de fracturas ensayadas fueron diseñadas en base a la norma ASTM E1820.

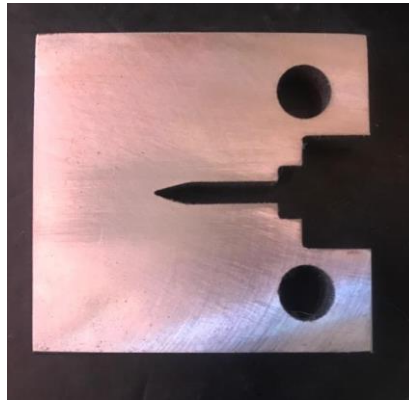


Figura 3.2.2 Probeta Ensayo de fractura

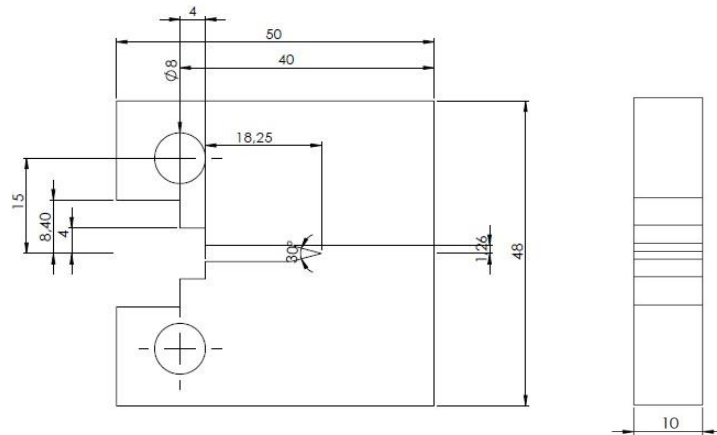


Figura 3.2.3 Dimensiones Probeta de Fractura

3.3 Metodología experimental

A continuación, se señalan los pasos llevados a cabo en el laboratorio para la obtención de resultados.

3.3.1 Ensayo de tracción

- Se realizó un ensayo de tracción a temperatura ambiente.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

- Se debe montar la probeta correspondiente, la cual estará previamente marcada de acuerdo a la Norma ASTM E8 [18].
- Se deben registrar las dimensiones de la probeta en el software al igual que la velocidad del cabezal, la cual se ajustó en 1.2 [mm/min], constante para todos los ensayos.
- Ya registrados todos los datos en el software, se procede a realizar la tracción.

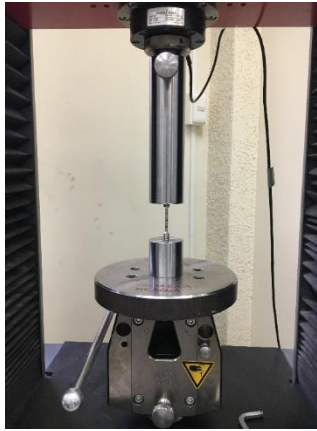


Figura 3.3.1 Ensayo de tracción

3.3.2 Ensayo de fractura

Existen 3 métodos aceptados en la norma ASTM E1820, en esta investigación se utilizaron dos de ellos, el método básico y el método de normalización. A continuación, se presenta la secuencia experimental para llevar a cabo el ensayo. En primer lugar, para llevar a cabo el ensayo de fractura, se debe inducir una grieta de 2 mm en una máquina de fatiga, aplicando una carga estática de 1.8 [kN] y una carga peak to peak de 2.9 [kN], en anexo se presenta el cálculo para determinación de estos valores.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



Figura 3.3.2 Esquema fisura probeta.



Figura 3.3.3 Programa fisura de probeta.

Luego de tener la grieta inducida por fatiga, se procede a realizar en el ensayo de fractura en la máquina de tracción a una velocidad de 1800 Newton por minuto, en anexo se presenta el cálculo para determinar esta velocidad, se registran los valores de carga y desplazamiento (clip-gage). Se realiza un total de 10 ensayos, donde el primero de ellos es libre, es decir no se restringe su carga ni desplazamiento, este sirve para modelo para las siguientes probetas, las cuales fueron cargadas y desplazadas hasta cierto punto para así poder determinar el J1c por el método básico.

Posterior al ensayo, la probeta es llevada a un horno por 30 minutos a 300 grados Celsius (heat teating), esto con el fin de “marcar” la grieta, para así facilitar su

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

posterior medición. Se rompe la probeta y se mide tamaño de grieta inicial y final en superficie de fractura.

3.3.3 Descripción de equipos

3.3.3.1 Máquina de tracción

Los ensayos de tracción y fractura son llevados a cabo en la máquina de tracción del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La máquina es de marca Zwick/Rowell modelo Z030 tal como se muestra en la figura 3.3.4, la cual alcanza una carga máxima de 30 [kN] y es versátil para pruebas con probetas cilíndricas o planas, además de velocidades bajas de desplazamiento.



Figura 3.3.4 Máquina de tracción

3.3.3.2 Máquina de fatiga

La fisura por fatiga de las probetas CT se realizan en la máquina de fatiga de la Universidad de Santiago de Chile. Es una maquina universal marca RUMUL universal con capacidad de 2 toneladas de capacidad en ciclado.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

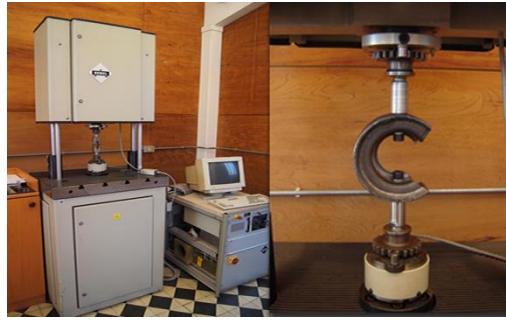


Figura 3.3.5 Máquina de fatiga

3.3.4 Montaje de muestras para metalografías

Se realiza un montaje en frío siguiendo los siguientes pasos:

- Realizar corte a la probeta en el sentido de la tracción.
- Limpiar el molde a utilizar con etanol.
- Para realizar el montaje, preparar una mezcla de razón resina: catalizador de 10:1. En este caso se utilizan 10 [ml] de resina IP y 1 [ml] de catalizador de resina IP.
- Poner la probeta en el centro del molde y rellenar con la mezcla preparada anteriormente.
- Llevar a desecador con bomba de vacío.
- Realizar un vacío durante 2 [min] y luego mantener la muestra allí durante 24 [horas].

3.3.5 Lijado y pulido

Para el lijado y pulido, se utilizó la máquina disponible en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad Técnica Federico Santa María, en figura 3.3.6. Dicho equipo corresponde ser GP-2-200 Metallographic Sample Grinding and Polishing Machine.

Alcanza entre 100-1400 [rpm] y posee un diámetro de 200[mm].

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



Figura 3.3.6 Equipo de lijado y pulido.

Para realizar el lijado de las muestras, es necesario seguir el siguiente orden de lijas:

- 320
- 400
- 600
- 800
- 1000
- 1200
- 800/2400
- 1200/4000

El lijado en todo momento es realizado con agua destilada sobre la muestra y 600 [rpm]. Además, es necesario girar en 90 grados la muestra cuando se cambia de lija. Una vez que se alcanza la superficie especular puede ser llevado a pulido.

Para realizar el pulido se siguen los siguientes pasos:

- Ajustar en 300 [rpm] para los primeros dos paños y 210 [rpm] para el último paño.
- El primer paño a utilizar es de 6 [micrones], se debe poner la respectiva pasta de diamante y aceite.
- Pulir por aproximadamente 15 – 20 [min].
- Repetir procedimiento anterior para los siguientes paños: 3 y ¼ [micrones]. Es estrictamente necesario seguir ese orden.

3.3.6 Ataque químico

El ataque químico que se realiza para apreciar maclas mecánicas en las metalografías corresponde ser:

- Sumergir la muestra en Nital 10% v/v durante aproximadamente 4 a 5 [min].
- Llevar al último paño de ¼ [micrones] durante 5 [segundos]
- Limpiar la superficie con etanol y secar.

3.3.7 Metalografía

Las metalografías tomadas son mediante el microscopio óptico marca Leitz/wetzlar modelo Metallux II perteneciente al Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dichas metalografías se toman con un aumento de lente óptico de 100x, las cuales se utilizarán para realizar el cálculo del tamaño de grano mediante el método de los interceptos. Además, es necesario tomar metalografías con aumento de lente óptico de 200x para apreciar de mejor forma las maclas mecánicas generadas durante la deformación plástica.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados y el análisis de los ensayos efectuados se presentan en el siguiente capítulo. El presente trabajo tiene como objetivo lograr caracterizar y comparar dos composiciones de aceros TWIP, en las que se cambia el porcentaje de cromo. Este capítulo es desarrollado en relación a los objetivos específicos ya propuestos.

4.1 Caracterizar el acero química y microestructuralmente (Objetivo N°1)

Las aleaciones a estudiar se diferencian químicamente a partir de la distinta composición que tienen, una con adición de cromo y la otra sin la adición de este elemento, esta diferencia química implica una diferencia en la energía de falla de apilamiento, parámetro relevante en el comportamiento de este tipo de material.

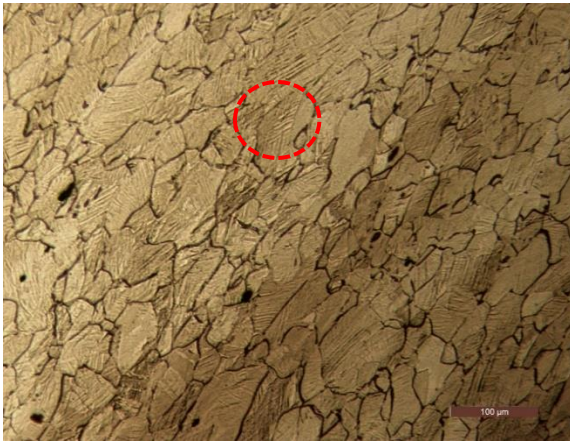
A temperatura ambiente las aleaciones presentan la siguiente energía falla de apilamiento teóricamente calculada:

Tabla 4.1.1 Energía falla de apilamiento a temperatura ambiente

Composición	Cálculo Energía falla de apilamiento
Fe-22Mn-0.6C	20
Fe-22Mn-0.6C-5Cr	16

Por otra parte, desde el punto de vista desde la microestructura, ambas presentaron solo la presencia de la fase austenítica y algunas inclusiones, cabe destacar que con adiciones de 10% de cromo se ha encontrado la presencia de carburos de este elemento en borde grano [19], situación que puede perjudicar algunas propiedades del material. A continuación, se presentan metalografías de ambas composiciones posterior a realizar ensayos de tracción a temperatura ambiente, en donde se puede apreciar que solo existe la presencia fase austenítica, como también en ambos casos la presencia de maclado mecánico, marcadas en un círculo rojo.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



(a) Fe-22Mn-0,6C-5Cr 100x



(b) Fe-22Mn-0,6C 200x

Figura 4.1.1 Metalografías a temperatura ambiente, post ensayo de tracción.

También se comprobó que ambas composiciones tuviesen el mismo tamaño de grano, posterior al laminado en caliente, para que este no fuese un factor a considerar en las propiedades mecánicas de las distintas composiciones, en ambos casos el tamaño de grano es $G=6$, lo que equivale a un diámetro promedio de $44.3 [\mu m]$.

4.2 Analizar las propiedades mecánicas y correlacionarlas con el porcentaje de cromo y con los mecanismos de deformación (Objetivo N°2)

4.2.1 Propiedades mecánicas

4.2.1.1 Ensayo de tracción a temperatura ambiente

Mediante las curvas de esfuerzo-deformación ingenieril se obtienen el esfuerzo de fluencia, UTS, elongación (δ), reducción de área (Φ) y parámetro de Hollomon (n).

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Tabla 4.2.1 Resultados ensayos de tracción a temperatura ambiente.

Composición	σ_{ys}	UTS	$\delta\%$	$\Phi\%$	n
Fe-22Mn-0.6C	429	905	40.8	40.2	0.47
Fe-22Mn-0.6C-5Cr	500	1037	43.6	66.3	0.51

Se puede observar en los resultados que la aleación con adición de cromo presenta mejores resultados en todos los aspectos, una justificación para este efecto puede ser que esta composición química genere una mayor fracción de maclado mecánico, que llevaría a aumentar tanto la resistencia mecánica como la ductilidad. Por otra parte, se debe tener en cuenta un endurecimiento por solución sólida debido al porcentaje de cromo, pero este efecto sólo respondería al aumento de los esfuerzos.

4.2.1.2 Ensayos de tracción a distintas temperaturas

Se realizan ensayos de tracción a distintas temperaturas con el objetivo de determinar los mecanismos de endurecimiento que participan en las distintas aleaciones de aceros TWIP, a partir de la curva de esfuerzo y deformación se puede apreciar la presencia del DSA y a través de la metalografía de las probetas ensayadas se puede determinar la presencia del maclado mecánico, además teniendo siempre en consideración la presencia del deslizamiento de dislocaciones. Además, se calcula teóricamente la energía de falla de apilamiento para cada temperatura, la cual es importante para tener una noción de a que temperaturas se encuentra la presencia de maclado mecánico-

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Tabla 4.2.2 Energía de falla de apilamiento a partir de cálculo teórico a distintas temperaturas.

5% Cromo		Sin Cromo	
Temperatura [°C]	SFE [mJ/m ²]	Temperatura [°C]	SFE [mJ/m ²]
18	15.8	18	19.9
100	26.5	100	40.3
200	29.3	200	36.9
300	43.4	300	54.9
350	50.3	350	63.8
400	57.3	400	72.6

Se puede observar que a medida que aumenta la temperatura, la energía de falla de apilamiento tiende a aumentar, se ha estudiado que para rangos superiores a los 50 mJ/m² sólo existiría la presencia de deslizamiento de dislocaciones como mecanismo de endurecimiento, es por esto que se espera que ya ha 400°C no se encuentre la presencia de maclado mecánico en ambas composiciones. Por otra parte, a través del modelo se puede observar que la presencia de cromo, afecta la energía de falla de apilamiento, disminuyendo su valor, es por esto que se espera que exista en un mayor rango de temperatura la presencia de maclado mecánico. Por medio de las curvas esfuerzo-deformación ingenieril obtenidas a diferentes temperaturas se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 4.2.3 Resultados ensayo de tracción a distintas temperaturas con 5% de Cr

Temperatura [°C]	σ_{ys} [MPa]	UTS [MPa]	$\delta\%$	$\Phi\%$	n
25	500	1037	43,6	66,3	0,51
100	590	1053	54,9	59,0	0,55
200	450	1008	41,0	66,4	0,50
250	400	1040	50,4	66,9	0,52
300	380	1019	59,3	67,1	0,50
350	360	807	73,7	57,2	0,55
400	340	789	61,5	62,3	0,45

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

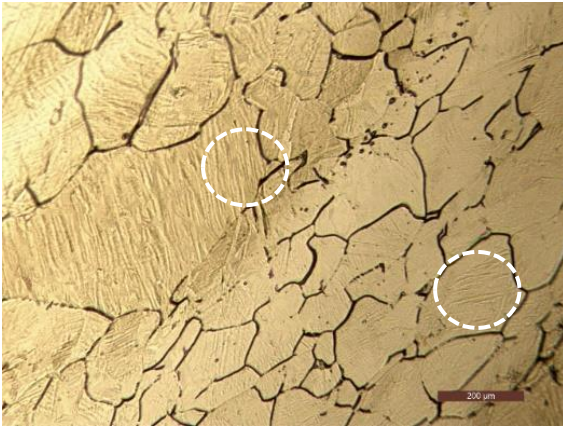
Tabla 4.2.4 Resultados ensayos de tracción a distintas temperaturas sin Cr [20].

Temperatura [°C]	σ_{ys} [MPa]	UTS [MPa]	$\delta\%$	$\Phi\%$	n
25	429	905	40,8	40,2	0,47
100	415	841	50,01	46,22	0,44
200	403	842	53,8	52,1	0,43
300	382	722	60,4	60,2	0,42
350	348	688	58,8	77,4	0,34
400	327	638	61,0	80,4	0,26

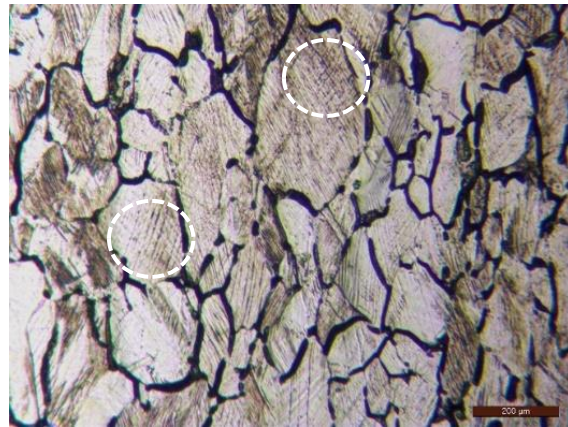
Se puede observar que en el caso de ambas composiciones el esfuerzo de fluencia y el UTS tienden a disminuir con el aumento de temperatura, por el contrario, la elongación y la reducción de área tienden a aumentar a medida que se incrementa la temperatura. El parámetro de Hollomon tiende a disminuir a medida que se aumenta la temperatura, lo cual es consecuente a lo que sucede con los esfuerzos. A partir de los resultados se puede observar que la reducción de área para la composición sin cromo, sufre un cambio más significativo de 300 a 400 °C, lo cual hace plantear la hipótesis de que el hecho de que la energía de falla de apilamiento disminuye con el efecto del cromo, hace retrasar la “desaparición” de maclado mecánico a temperaturas más altas, evitando con esto la formación de cuello en la probeta, principal fenómeno que afecta a la reducción de área, esto se analiza más adelante a través de la metalografía .

A continuación, se presentan las metalografías para las distintas temperaturas de la aleación con un 5% de contenido de cromo, en donde se remarca en un círculo la clara presencia del maclado mecánico.

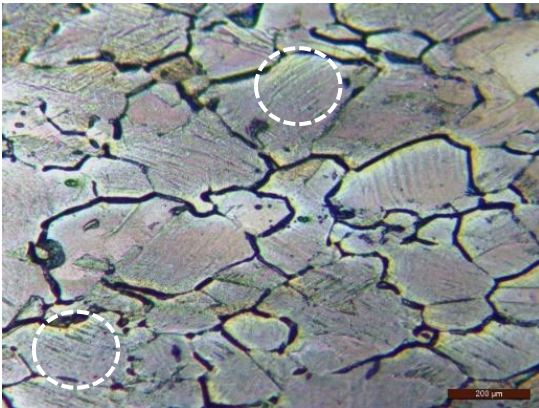
ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



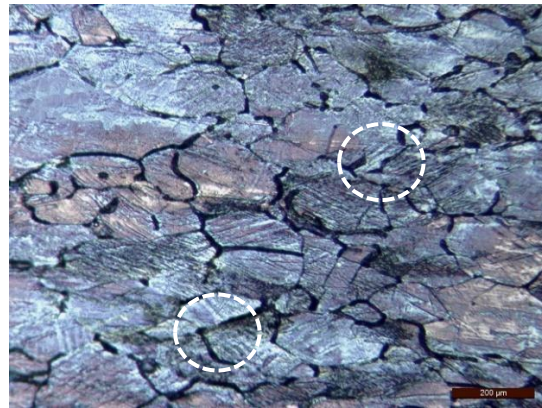
(a) 20°C



(b) 100°C



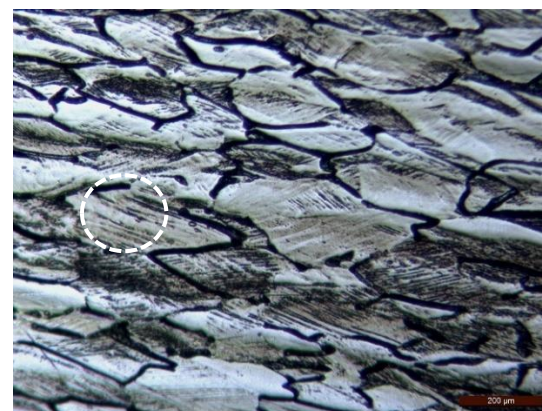
(c) 200°C



(d) 250°C

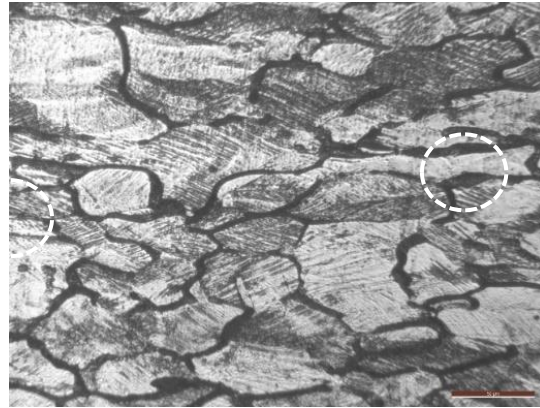


(e) 300°C



(f) 350°C

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



(g) 400°C

Figura 4.2.1 Metalografías a distintas temperaturas, aumento 200x.

Se puede observar en las metalografías que a las distintas temperaturas existe una importante cantidad de maclado mecánico para la composición con 5% de cromo, incluso hasta los 400°C se sigue presentando una cantidad considerable de maclado mecánico. Por otra parte, la aleación de Fe0.6C22Mn en la investigación de De Barbieri encontró que el maclado mecánico es el mecanismo de endurecimiento predominante hasta los 300°C posterior a eso no se presenta en grandes cantidades [20], a partir de esto se comprueba que el maclado mecánico tiene un mayor rango de aparición, respecto a la temperatura, en la aleación Fe0.5C22Mn5Cr obteniendo así una menor reducción de área en la probeta y también un aumento en el endurecimiento por deformación a más altas temperaturas.

Para estudiar la presencia del DSA, se debe observar la curva de esfuerzo deformación obtenida para cada temperatura, De Barbieri estudió lo que acontece con este mecanismo para la aleación Fe0.6C22Mn [20] a diferentes temperaturas, donde se obtuvo los siguientes resultados.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

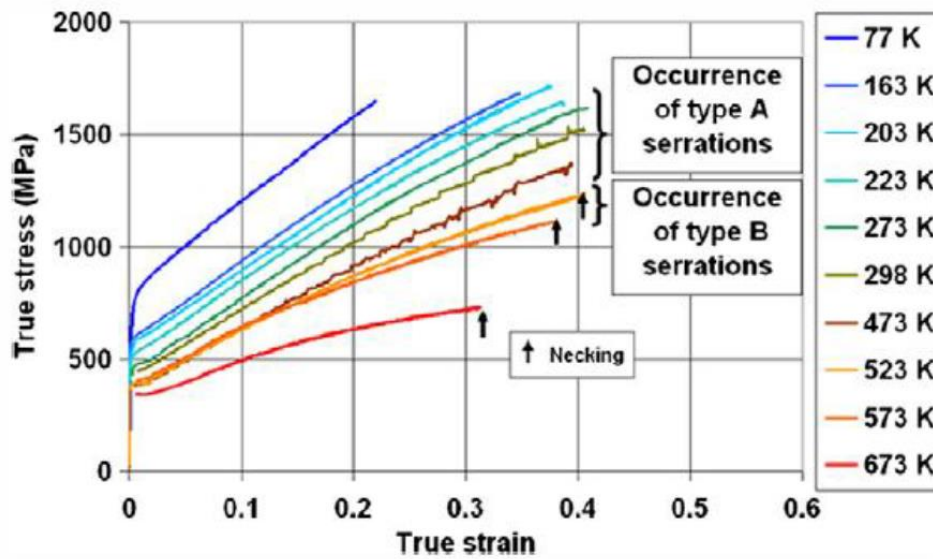
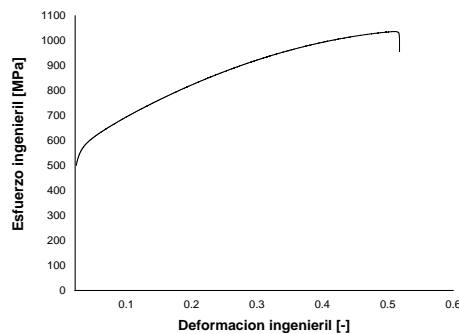


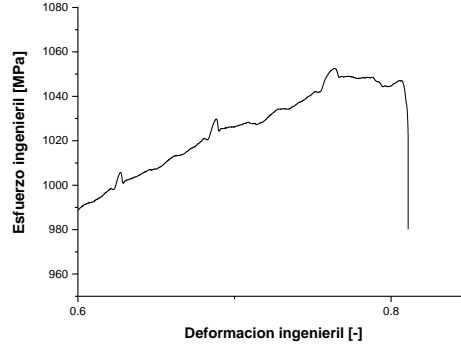
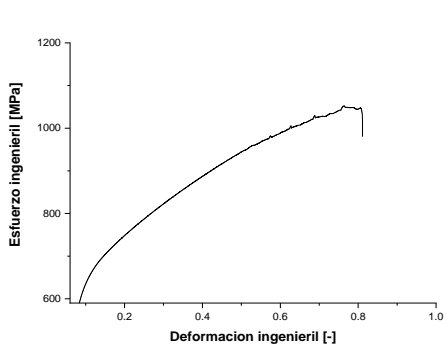
Figura 4.2.2 Curva esfuerzo deformación Fe22Mn0.6C, a distintas temperaturas

Se puede concluir que, para la aleación sin contenido de cromo, el mecanismo de endurecimiento DSA ocurre desde la temperatura ambiente (25°C) hasta los 300°C. A continuación, se presentan las curvas de esfuerzo-deformación para la aleación Fe0.6C22Mn5Cr.

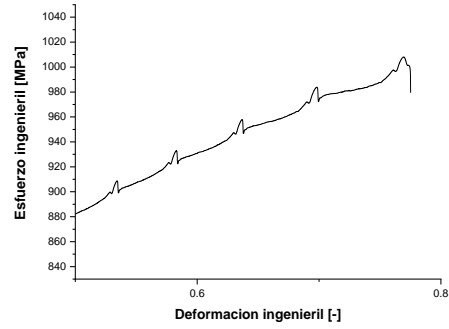
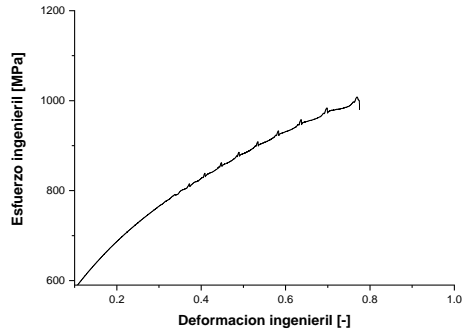


(a) 20°C

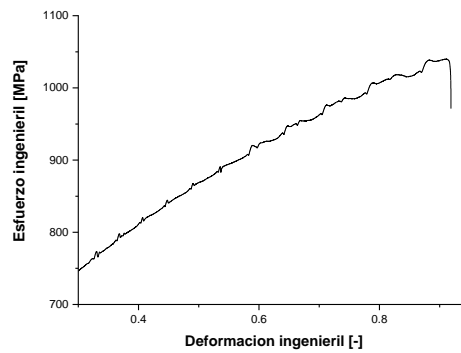
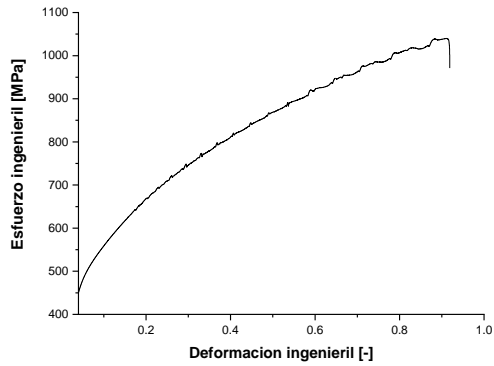
ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



(b) 100°C

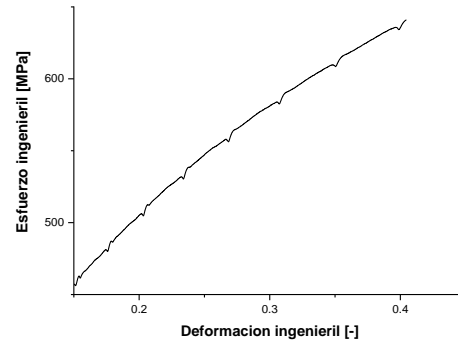
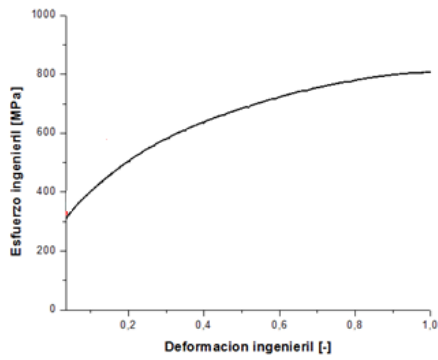


(c) 200°C

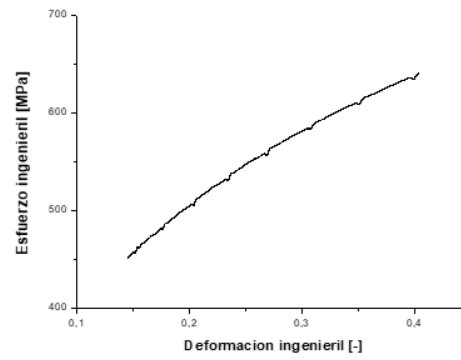
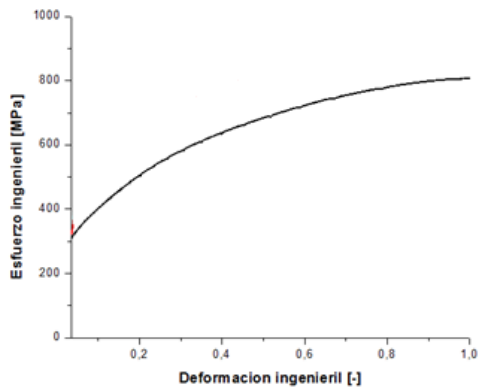


(d) 250°C

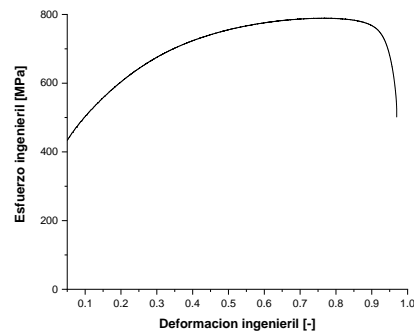
ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



(e) 300°C



(f) 350°C



(g) 400°C

Figura 4.2.3 Curvas esfuerzo deformación Fe22Mn0.6C5Cr, a distintas temperaturas.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

De los gráficos se puede observar que la composición con un 5% de cromo no presenta efecto de DSA a temperatura ambiente, diferenciándose así de la composición sin cromo, esto se debe a que el cromo disminuye la movilidad del carbono [11] . Desde los 100°C a los 350°C si se observa la presencia de DSA, distinguiéndose más claramente a través de un acercamiento a la zona plástica en las figuras de la zona derecha de la hoja para cada temperatura. Cabe destacar que se presentan con distintas morfologías, a los 100°C y 200°C se presentan las bandas de tipo A, a las 250°C se pueden observar bandas de tipo A y tipo B, este fenómeno sucede cuando se encuentra en una temperatura de transición de ambas bandas, y finalmente a la temperatura de 300°C y 350°C se puede observar bandas de tipo C. A temperatura de 400°C no presenta el mecanismo de endurecimiento por envejecimiento por deformación dinámico. Comparando ambas aleaciones, se puede concluir que la diferencia principal ocurre a temperatura ambiente, y es que el efecto del cromo inhibe el mecanismo de endurecimiento por deformación dinámico debido a que afecta la movilidad del carbono, este efecto desaparece a temperaturas más altas, ya que esta le aporta la suficiente movilidad al carbono para producir el DSA.

En conclusión, se destaca que el mejor resultado respecto a propiedades mecánicas se presentó en la aleación con 5% de cromo a la temperatura de 100°C, temperatura no tan alta comparado a las otras y en la cual se tiene la participación de tres mecanismos de endurecimiento (maclado mecánico, deslizamiento de dislocaciones, DSA). El porcentaje de cromo afecta a la energía de falla apilamiento, esto afecta en los mecanismos de endurecimiento por deformación, aumentando el rango de temperatura en el cual aparece el maclado mecánico, lo que genera valores de “n” más altos, además se inhibe la aparición del DSA a temperatura ambiente, debido a que afecta la movilidad del carbono. De los resultados obtenidos se puede plantear la hipótesis que la adición de un 5% de Cromo, produce una mayor fracción maclado mecánico, debido a que presenta mayores esfuerzos y mayor ductilidad, se recomienda determinar experimentalmente la fracción de maclado para ambas aleaciones. Se puede concluir que en ningún caso la adición de un 5% de cromo afecta negativamente las propiedades mecánicas del material,

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

resultado bastante prometedor, tomando en cuenta que el cromo es un elemento aleante principalmente utilizado para mejorar propiedades de resistencia a la corrosión.

4.3 Obtener el valor del parámetro J1c y relacionarlo con el porcentaje de cromo (Objetivo N°3).

Para obtener el valor del parámetro J1c existen distintos métodos, algunos de ellos regidos por la norma ASTM E 1820, y otros presentados en distintas investigaciones. Dependiendo cual sea el caso, estos métodos pueden obtener el valor J1c el cual es definido como el punto de iniciación del crecimiento estable de grieta, como también en algunos casos la curva de resistencia, que permite entender el comportamiento en fractura de un material dúctil.

4.3.1 Método básico Aleación Fe22Mn0.6C5Cr.

Para determinar el valor de J1c en primer lugar se debe generar la pre grieta por fatiga, a partir de los cálculos desarrollados en el anexo, en este caso se va a trabajar con pregrietas alrededor de los 2.5 mm, posterior a la fatiga se realizan los “side grooves”, con el objetivo de favorecer el crecimiento de grieta por el plano de fractura que corresponde. Con el fin de facilitar la metodología la primera probeta es libre respecto de carga y desplazamiento, y a partir de esta se va determinando hasta que punto de desplazamiento cargar las siguientes probetas.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

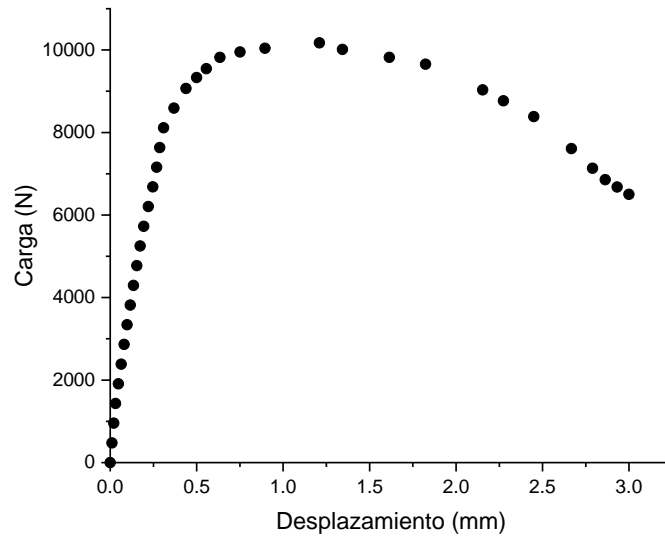


Figura 4.3.1 Curva carga desplazamiento.

Como se puede observar en la curva madre, el punto máximo alcanzado se ubica un poco sobre los 10000 Newton, es por esto que las siguientes 9 probetas, se cargaron algunas a cifras cercanas, tanto en alza como en baja, respecto a este valor y su respectivo desplazamiento. A continuación, se presentan 7 curvas de carga desplazamiento, cada una obtenida a partir de una probeta nueva, estas curvas dan cuenta de lo mencionado anteriormente, es decir fueron cargadas hasta un determinado valor de carga. Uno de los ensayos no cumplió con la norma ASTM E 1820.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

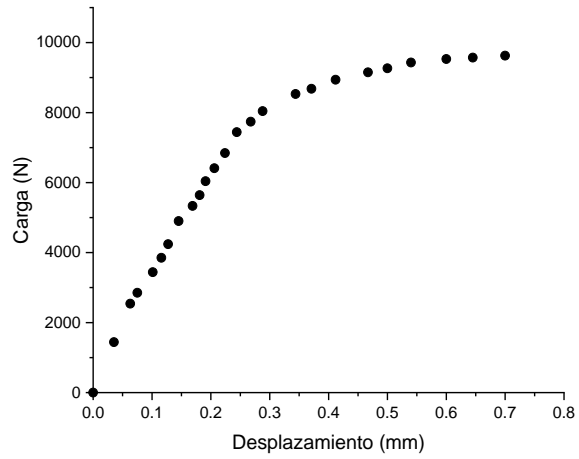


Figura 4.3.2 Curva carga desplazamiento, probeta 1.

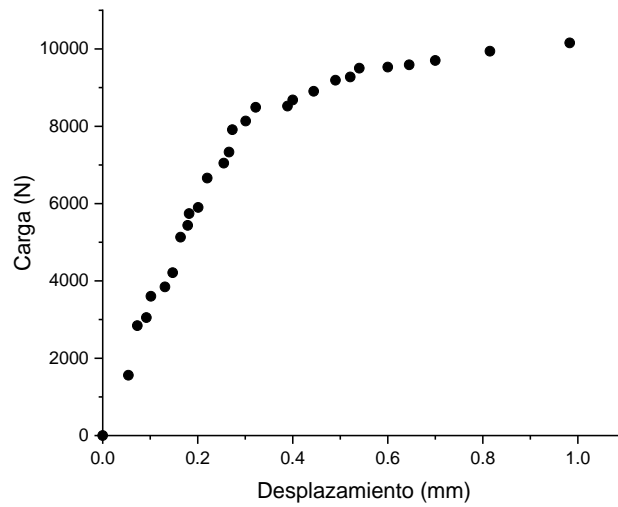


Figura 4.3.3 Curva carga desplazamiento, probeta 2.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

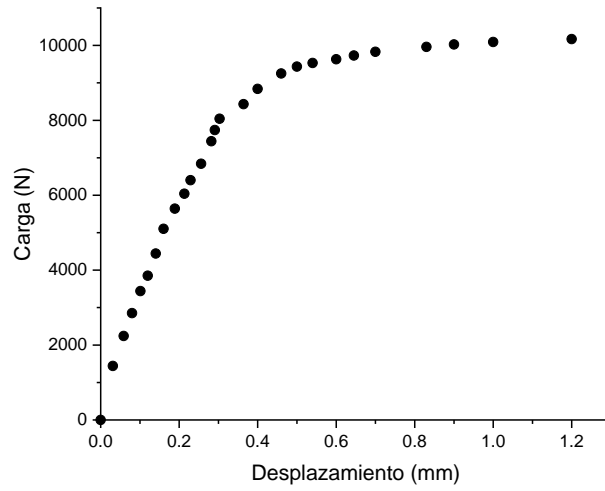


Figura 4.3.4 Curva carga desplazamiento, probeta 3.

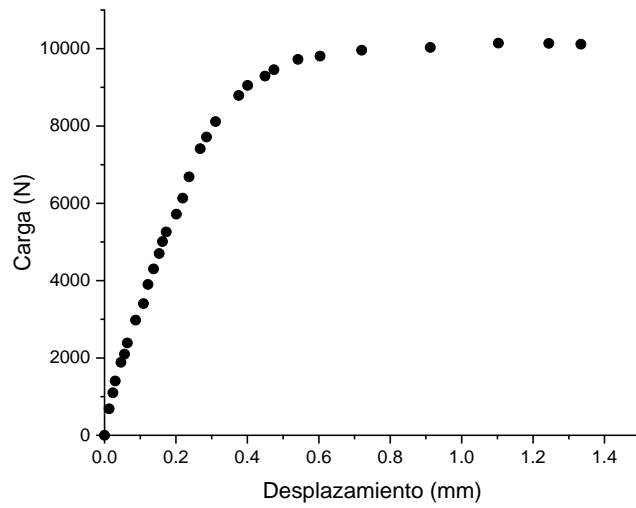


Figura 4.3.5 Curva carga desplazamiento, probeta 4.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

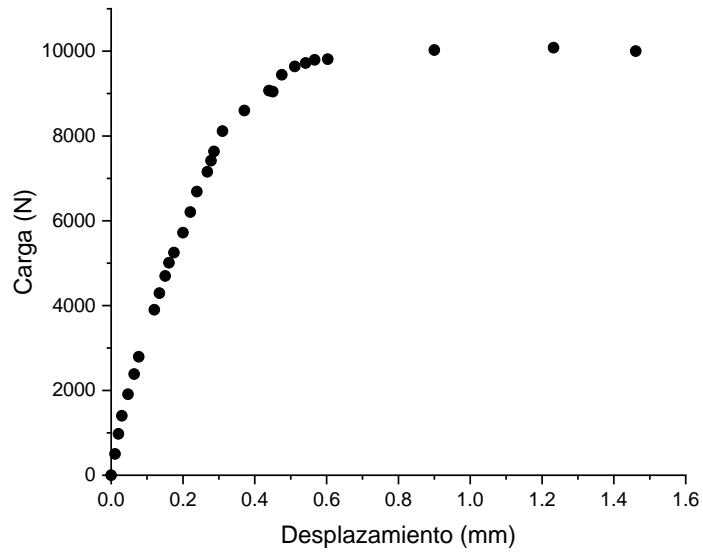


Figura 4.3.6 Curva carga desplazamiento, probeta 5

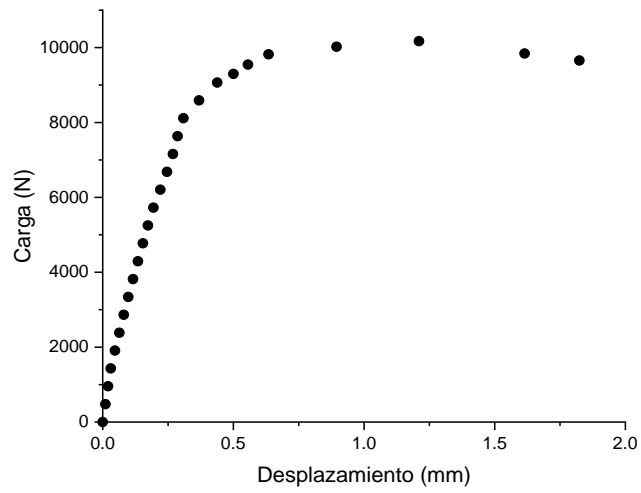


Figura 4.3.7 Curva carga desplazamiento, probeta 6.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

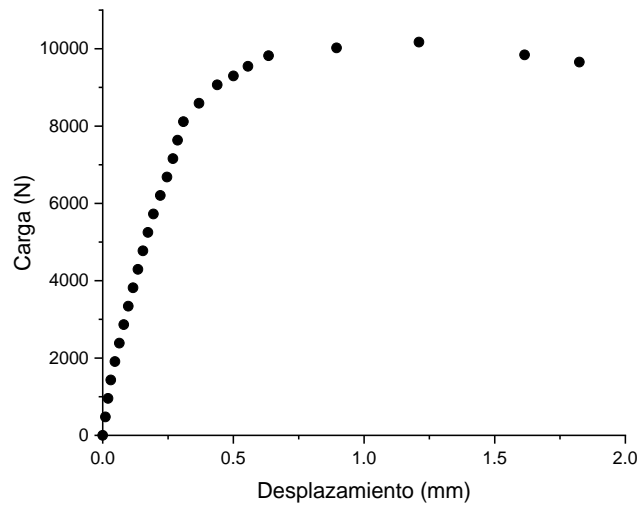


Figura 4.3.8 Curva carga desplazamiento, probeta 7.

A partir de cada una de estas curvas se genera un punto en la curva de resistencia del material, toda indicación es realizada bajo la norma ASTM E1820, para obtener la curva de resistencia se deben realizar los siguientes cálculos para tener los valores de J_{el} y J_{pl} :

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

$$J_{pl} = \frac{A_{pl} \eta_{pl}}{B_n b_0} \quad (2)$$

El detalle del procedimiento y los valores de estos cálculos para cada probeta se detallan en el capítulo de anexos. A partir de estos valores, y de los tamaños de grieta iniciales y finales, obtenidos físicamente de cada probeta, se genera la siguiente curva.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

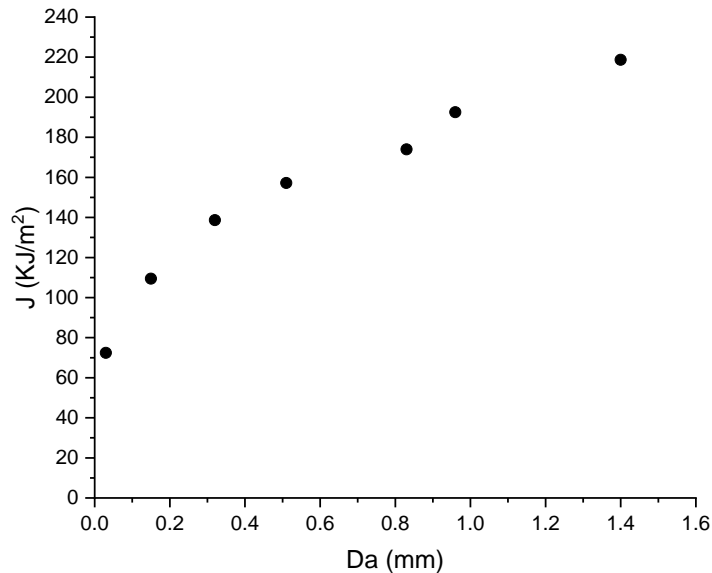


Figura 4.3.9 Curva J-Da

Se debe tener en cuenta que la norma pide graficar los valores máximos permitidos J_{max} y Δa_{max} ,

$$\Delta a_{max} = 0.25 * b_0$$

$$J_{max} = B * \frac{\sigma_y}{10} \quad \text{o} \quad b_0 \sigma_y / 10$$

En este caso se obtiene un valor de J_{max} de 765 [KJ/m²] y Δa_{max} 3.875 [mm], estos valores no han sido graficados ya que los datos obtenidos se encuentran ampliamente dentro de estos rangos.

Se deben construir la línea de “construcción”, líneas de “exclusión” y la línea “offset”, para esto se tiene la línea de construcción como lo siguiente:

$$CL = 2 * \sigma_y * Da \quad (3)$$

Esta línea se traslada en 0.15, 0.2 y 1,5 mm para obtener la línea offset y las líneas de exclusión, se agregan estas rectas a la curva J-Da.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

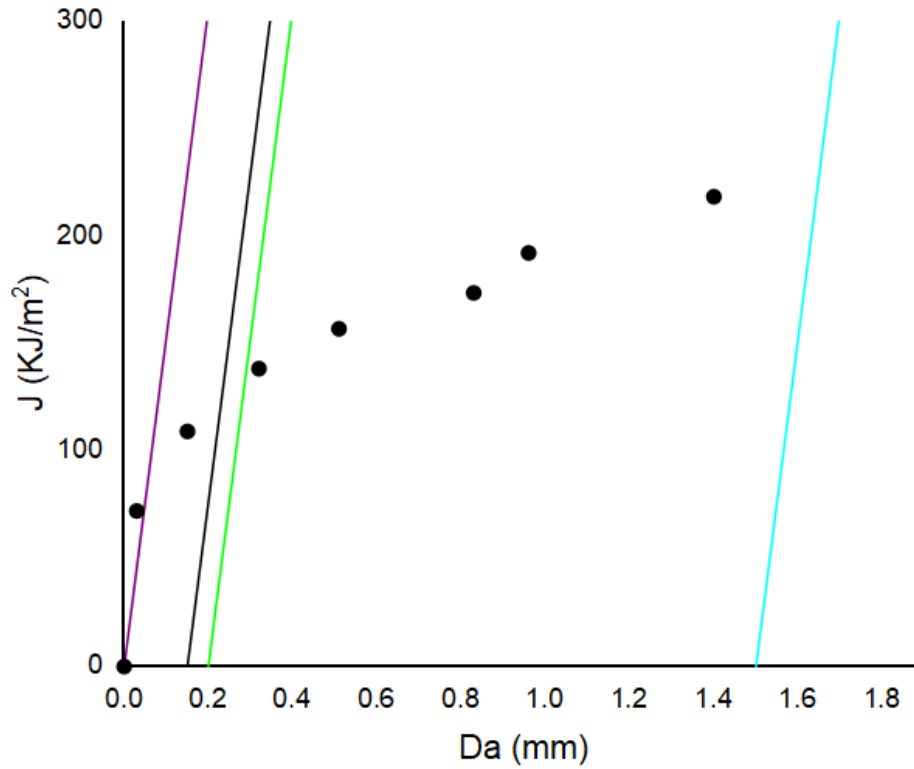


Figura 4.3.10 Curva J-Da, líneas de construcción para calificar la data

El siguiente paso consiste en linealizar los datos obtenidos a través de la siguiente ecuación y obtener los parámetros C1 y C2.

$$\ln J = \ln(C1) + C2 * \ln(da) \quad (4)$$

Obteniéndose los valores de C1= 191.502 y C2=0.28288, y la siguiente curva.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

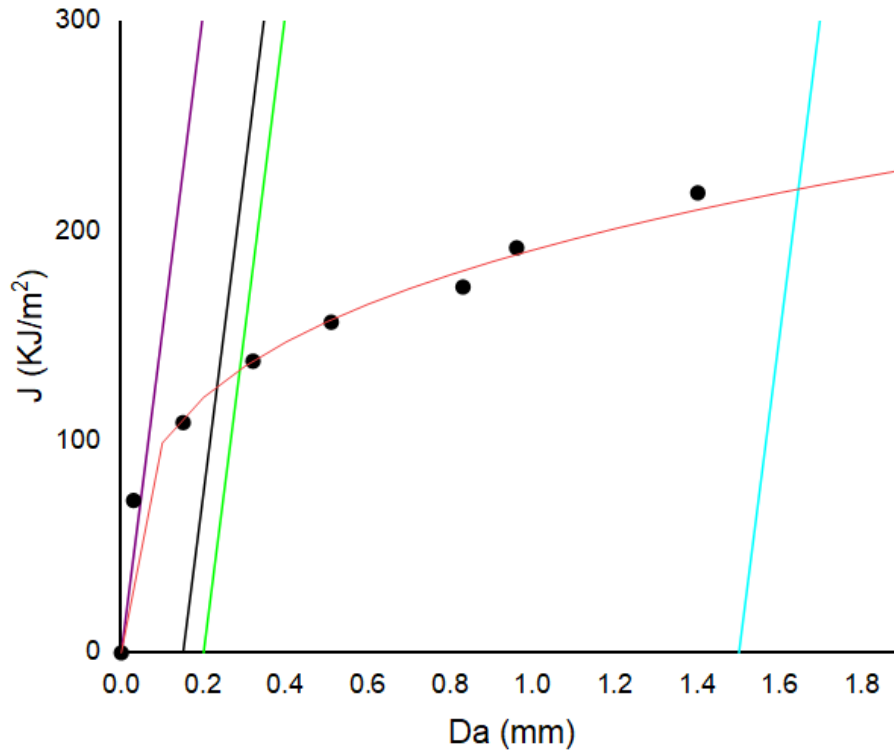


Figura 4.3.11 Curva J-Da, con regresión lineal.

Finalmente, para poder determinar el valor de J_{1c} , se debe revisar la data, en el siguiente gráfico se presenta en color gris la región de data calificada para determinar el valor de J_{1c} .

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

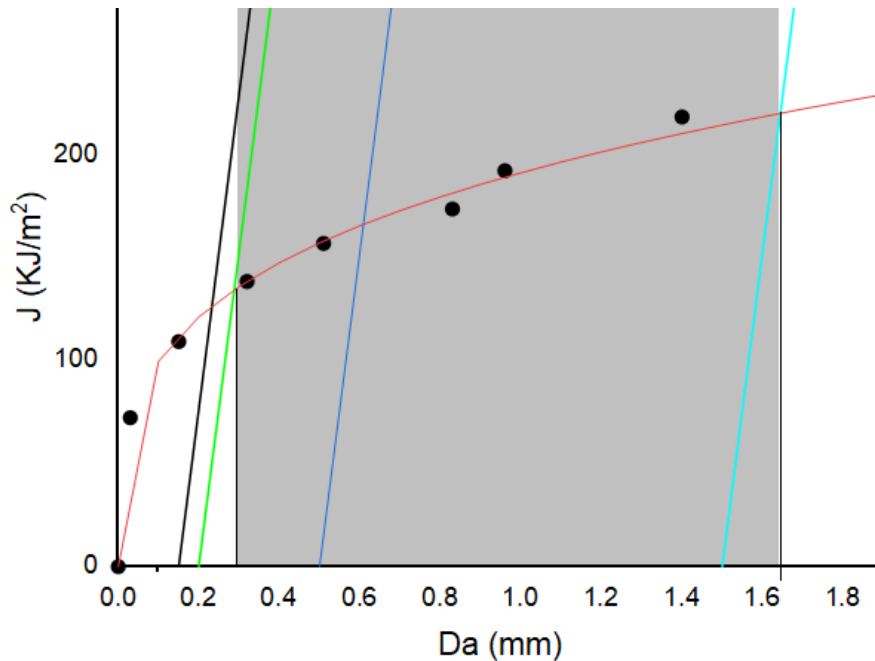


Figura 4.3.12 Curva J-Da, región de zona calificada.

Se puede observar que se cumple con el inciso de la norma que indica que al menos debe haber 5 puntos en la región de data calificada, como también con el inciso en que la norma indica al menos un punto entre la línea de exclusión 0.5 y la línea de exclusión 1.5.

Con la data ratificada, se obtiene a partir del gráfico en la intersección de la curva con la línea offset, un valor de J llamado J_q , que viene a ser un candidato a J_{1c} . En este caso se obtiene un valor de J_q de 136 [KJ/m²], que debe ser revisado en base a las siguientes ecuaciones:

$$Da_i = \frac{J_q}{2\sigma_y} + 0.2 \quad (5)$$

$$J_{q(i+1)} = C1 * Da_i^{C2} \quad (6)$$

El valor candidato J_q , se debe ingresar a la ecuación (5), obteniendo un Da que debe ingresar a la ecuación (6). Se debe probar hasta que el valor de J_q y $J_{q(i+1)}$ no

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

se diferencien por más de un 2%. Así el valor de J_{1c} obtenido por el método básico fue de 135 [KJ/m²].

4.3.2 Método normalización aleación Fe22Mn0.6C5Cr.

La normalización es un método que se encuentra en la norma ASTM E1820 que tiene como objetivo generar la curva J-R directamente desde un registro de fuerza y desplazamiento (sin el uso de clip-gage) y enfocado principalmente en casos donde se apliquen velocidades muy altas de ensayo, altas temperaturas y/o ambientes agresivos, es decir en situaciones en donde no sea factible la utilización de un aparato para medir el desplazamiento efectivo en la probeta. En esta investigación se va a utilizar este método para comparar su resultado con el del método básico, y validarlo como una opción más rápida y económica para determinar el valor de J_{1c} y curva de resistencia del material.

El primer paso para aplicar este método consiste en realizar un ensayo hasta un valor de desplazamiento determinado y obtener la curva, mismo procedimiento aplicado en el método básico. Se obtiene la siguiente curva

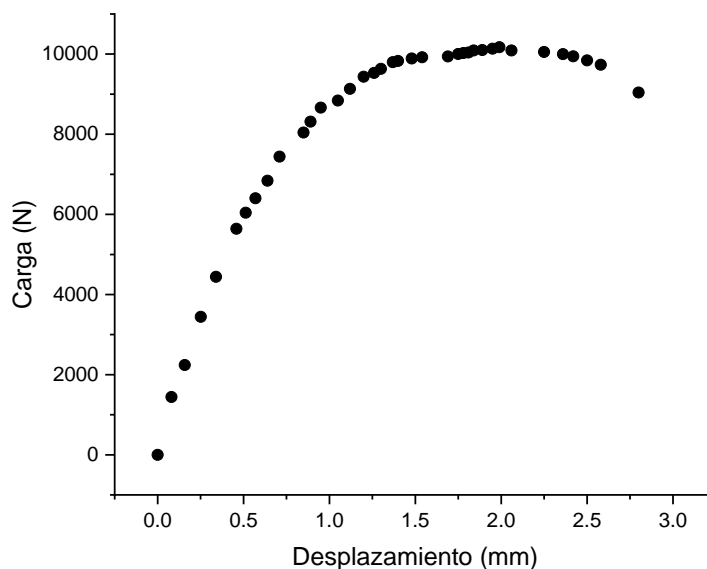


Figura 4.3.13 Curva carga desplazamiento, normalización.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Cada valor de carga y desplazamiento debe ser normalizado a partir de las siguientes ecuaciones, usando el tamaño de grieta inicial:

$$P_{NI} = \frac{P_i}{WB \left(\frac{W-a_{bi}}{W} \right)^{\eta_{pl}}} \quad (7)$$

$$V'_{pl} = \frac{V_{pl}}{W} = \frac{V-PC}{W} \quad (8)$$

El punto final de la figura 4.3.13 debe ser normalizado usando el valor de tamaño de grieta final, a partir de este último punto se debe realizar una recta tangente a la curva normalizada, para determinar con que data se debe seguir trabajando.

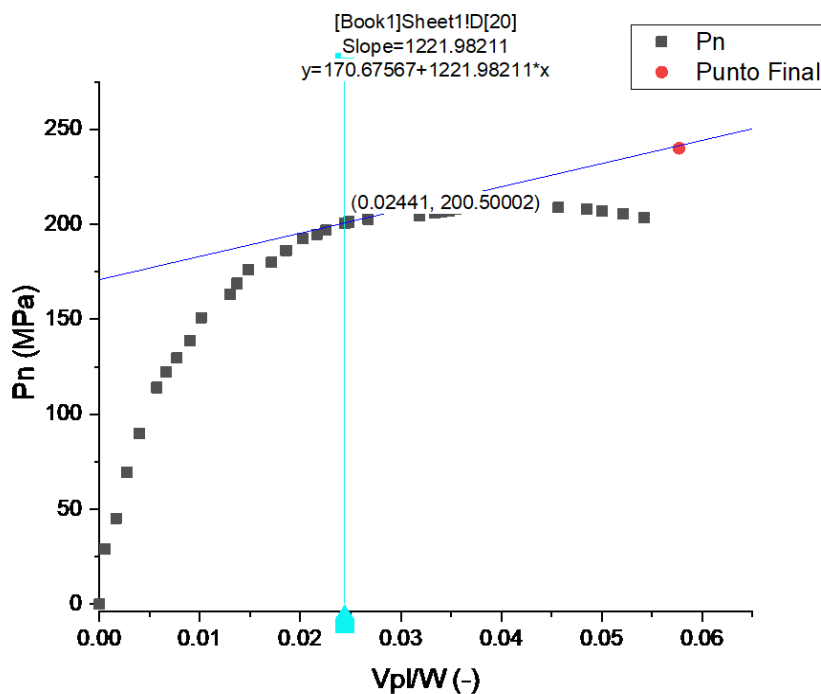


Figura 4.3.14 Recta Tangente de punto final a curva normalización.

Posteriormente a través de la siguiente función de normalización, se debe generar la curva P_n , de tal forma que se ajuste a la data remanente del paso anterior, excluyendo los datos posteriores al punto de la curva en donde se intercepta con la recta tangente.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

$$P_N = \frac{a+bV'_{pl}+cV'_{pl}}{d+V'_{pl}} \quad (9)$$

Con los valores de $a = 0.09057$, $b = 273.795$, $c = 0$ y $d = 0.00917$ se obtuvo el siguiente ajuste:

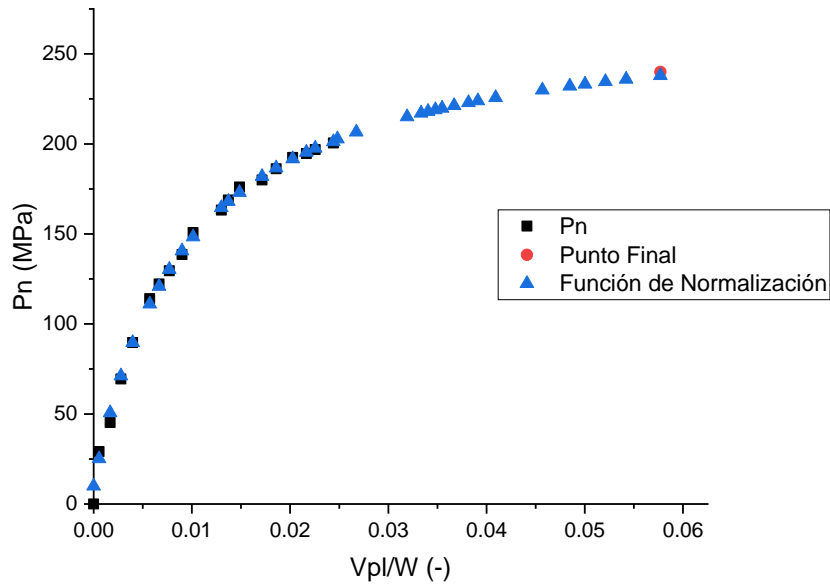


Figura 4.3.15 Ajuste de función de normalización con la curva normalizada y el punto final.

Al ya tener la función de normalización definida, ahora el siguiente paso consiste en ajustar la ecuación (7) con la función de normalización, a partir de los valores de tamaño de grietas nuevos, es decir cambiando el a_i

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

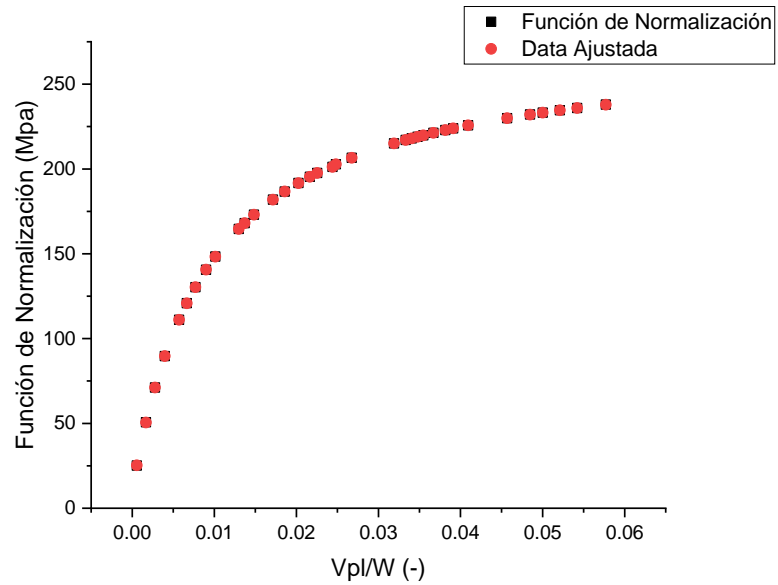


Figura 4.3.16 Ajuste de función de normalización con data ajustada con nuevo tamaño de grieta.

De esta manera se obtiene un tamaño de grieta para cada dato de fuerza y desplazamiento, con lo que se puede realizar la curva J-R, en base a la norma ASTM E1820, como se muestra en la figura 4.3.17

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

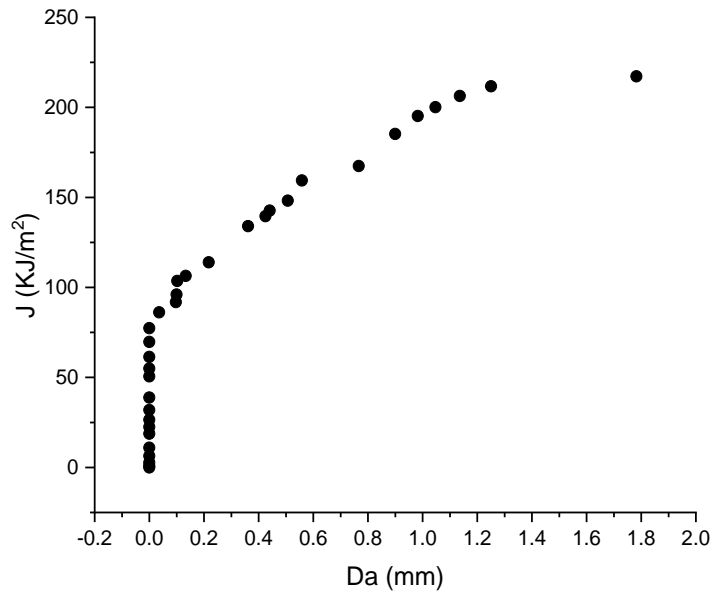


Figura 4.3.17 Curva J-Da, método normalización.

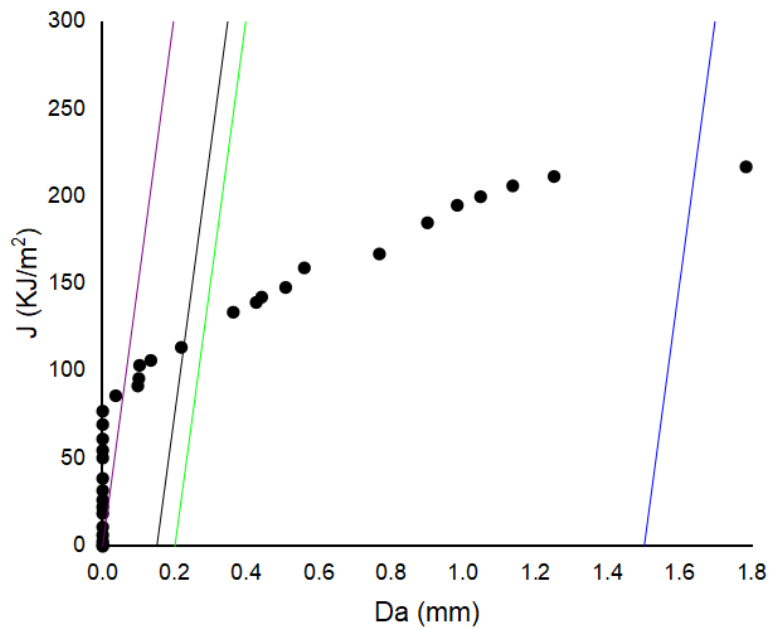


Figura 4.3.18 Curva J-Da con líneas de construcción.

Se obtiene la linealización con los valores de $C1=194.199$ y $C2=0.2918$

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

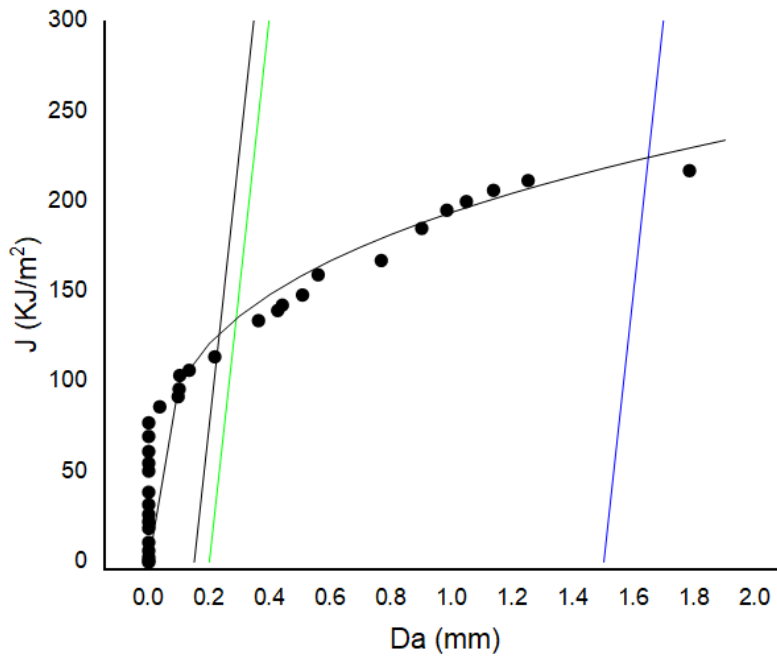


Figura 4.3.19 Curva J-Da, con regresión lineal.

Y finalmente se determina la región de datos calificados, para poder evaluar el valor J_q .

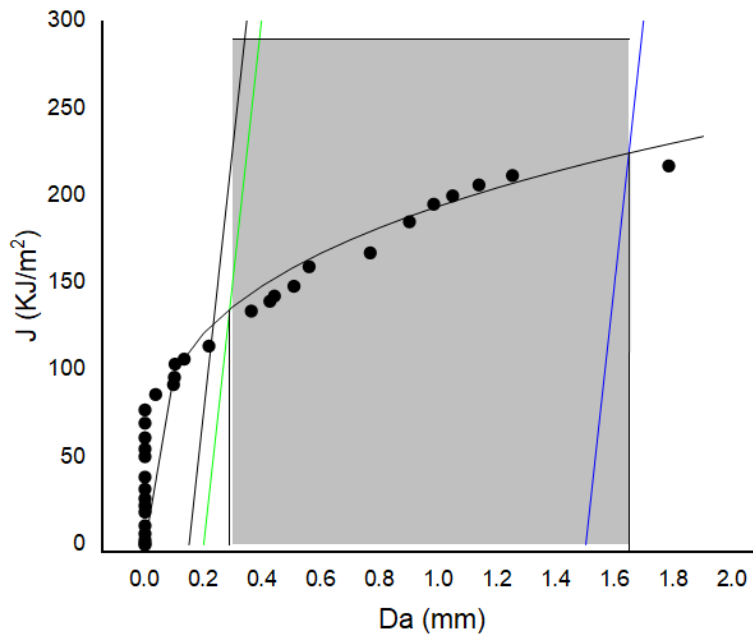


Figura 4.3.20 Curva J-Da, zona región de data calificada.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Al igual que en el método básico se debe evaluar a un candidato J_q , usando el mismo procedimiento, para obtener el valor J_{1c} , dando como resultado 135 [KJ/m²], mismo valor obtenido con el procedimiento del método básico.

En el siguiente gráfico se puede ver una comparación de las curvas R obtenidas por los distintos métodos.

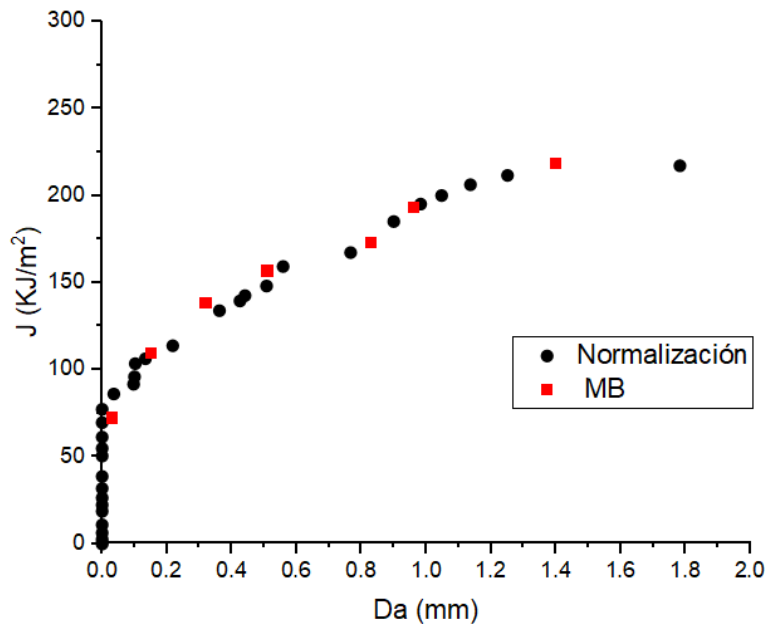


Figura 4.3.21 Curva J - Da , normalización y método básico.

Se puede observar que ambos métodos presentan un comportamiento bastante similar en los valores de J que se obtienen respecto al crecimiento de tamaño de grieta, y que la normalización tiene la capacidad de entregar una cantidad considerablemente mayor de datos con tan solo una probeta, siendo un método más rápido y económico. Se puede concluir entonces que la normalización si es una herramienta válida para determinar la tenacidad a la fractura de un material elastoplástico, en el caso de no contar con la posibilidad de realizar la técnica de descargas parciales.

4.3.3 Aleación Fe0.6C22Mn

Para la aleación sin contenido de cromo, se presenta el valor de J1c.

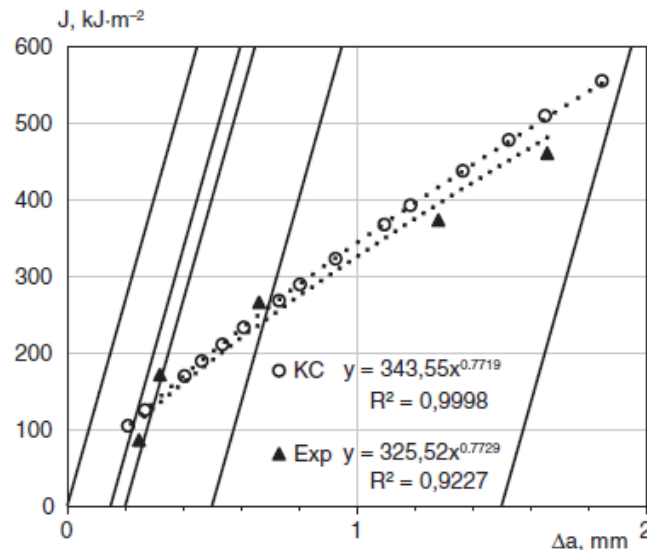


Figura 4.3.22 Curva J-Da, experimental y key curve.

En la figura 4.3.22 se puede observar datos experimentales, como también datos de un método similar al de normalización conocido como Key Curve, que busca a partir de una probeta obtener una curva J-Da. En esta investigación se obtuvo un valor J1c de 127 [KJ/m²], cumpliendo con la norma ASTM E1820 [21].

Se puede concluir entonces que la aleación con adición de cromo presenta un pequeño aumento en el valor de J1c, lo que puede deberse a la mayor fracción de maclado que presenta la composición química con 5 % de Cr,.. A partir de los respectivos valores de J1c se obtiene el valor de K1c para ambas aleaciones, Fe22Mn0.6C con 164 [MPa√m] y Fe22Mn0.6C5Cr 154.14 [MPa√m]. Debido a la complejidad y costos que implica realizar ensayos de tenacidad a la fractura, pero también debido a la importancia de esta propiedad, es que existen algunas relaciones empíricas entre el valor K1c y valores de ensayos Charpy, aprovechando la facilidad de llevar a cabo este último ensayo. En este caso se usa al inverso esta información, es decir de un valor K1c se obtiene el valor de Charpy, mediante la siguiente ecuación.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

$$K1c = 8.47 * CVN^{0.63} \quad (10) [22]$$

Obteniendo el valor de 100 [J] para la aleación de Fe22Mn0.6C5Cr y 110 [J] para la aleación Fe22Mn0.6C. Al igual que en el objetivo número 2, se puede concluir que en ningún caso la adición de cromo produce un efecto negativo importante en las propiedades de la aleación en la tenacidad de fractura y resistencia al impacto, siendo resultados bastante alentadores, ya que la adición del cromo busca mejorar las propiedades a la resistencia a la corrosión. Como recomendación se indica a tomar en cuenta, determinar el parámetro de fracción de maclas en próximas investigaciones, ya que este es el mecanismo que mayormente destaca en los aceros TWIP, estudiar el efecto del 5% de cromo en las propiedades de corrosión del material y seguir probando nuevas composiciones químicas, con el fin de utilizar los aceros TWIP en industrias nacionales como la minería y otras.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En esta investigación se planteó la realización de tres objetivos con el fin de aumentar los conocimientos y medir el efecto del cromo en propiedades mecánicas y de tenacidad a la fractura de los aceros TWIP con composición Fe₂₂Mn_{0.6}C y Fe₂₂Mn_{0.6}C₅Cr. Es por esto que se realizaron ensayos de tracción a diferentes temperaturas y ensayos de fractura.

En primer lugar, los resultados obtenidos muestran que ambas aleaciones tienen la característica de ser monofásicas, sólo poseen la fase austenítica y en ambas se aprecia la aparición de maclado mecánico, mecanismo de endurecimiento característico de los aceros TWIP. A temperatura ambiente, si bien las diferencias no son considerables, se aprecia un mejor desempeño en las propiedades mecánicas obtenidas a partir del ensayo de tracción, para la aleación con adición de cromo. Por otra parte, el contenido de cromo influye en la energía de falla de apilamiento, la cual domina todos los mecanismos de endurecimiento presente en los aceros TWIP, a partir de un modelo se concluye que el cromo disminuye la energía de falla de apilamiento, produciendo un rango de temperaturas más amplio de aparición del maclado mecánico respecto a la aleación sin contenido de cromo. Con respecto al mecanismo de endurecimiento por deformación dinámico relacionado con el efecto de Portevin Le Chatelier, este va cambiando de acuerdo a las temperaturas y composiciones. Para contenidos de cromo de 5% es posible obtener el efecto de PLC desde los 100 [°C] hasta los 350 [°C]. Temperaturas de 100 y 200 [°C] presentan bandas de PLC tipo A, mientras que a los 250 [°C] se tiene una temperatura de transición presentando bandas de PLC tipo A y tipo B. Finalmente para temperaturas de 300 y 350 [°C] se observan bandas PLC tipo C. Por su parte, la aleación sin contenido de cromo presenta el mecanismo de endurecimiento por deformación dinámico desde temperatura ambiente hasta los 300[°C]. Se concluye que el porcentaje de cromo produce un “retraso” en la aparición de este mecanismo debido a que reduce la movilidad del carbono. Finalmente se realizaron ensayos de fractura con el fin de obtener el valor de J_{1c} de la aleación Fe₂₂Mn_{0.6}C₅Cr, se utilizaron dos métodos de la norma ASTM

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}CxCr

E1820, método básico y de normalización. Se concluyó que ambos métodos obtuvieron el mismo resultado, recomendando la utilización del método de normalización debido a su fácil implementación y bajo costo. Comparando ambas aleaciones se obtuvieron valores bastante similares que el valor de J_{1c} no es muy diferente, obteniendo 135 [KJ/m²] para la aleación Fe₂₂Mn_{0.6}C₅Cr y 127 [KJ/m²] para la aleación sin cromo.

En resumen, se concluye que el efecto de cromo en la aleación clásica de aceros TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}C no altera negativamente las propiedades mecánicas y de tenacidad a la fractura, incluso en algunos casos puede mejorarla, siendo un resultado bastante prometedor considerando que este elemento aleante se utiliza principalmente con el objetivo de mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión.

CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] F. De Barbieri, A. Monsalve y A. Guzman, «TWIP, Aceros de Alto porcentaje de Manganeso. Sus Mecanismos y Fenómenos asociados. Parte I,» *remetallica*, p. 27, 2013.
- [2] L. Chen, Y. Zhao y X. Qin, «Some Aspects of High Manganese Twinning-Induced,» *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.) Vol.26 No.1*, p. 2, 2013.
- [3] B. De Cooman, Y. Estrin y S. Kim, «Twinning induced Plasticity (TWIP) steels,» *Acta Materialia*, pp. 283-362, 2018.
- [4] D. C. H. S. Piyas Chowdhury, «On deformation behavior of Fe-Mn based structural alloys,» *Material Science and Engineering*, n° 122, pp. 1-28, 2017.
- [5] J. S. S. O. A. Dumay, «Influence of addition elements on the stacking fault energy and mechanical properties of an austenitic Fe-Mn-C steel,» *Materials Science and Engineering*, vol. A, n° 483-484, pp. 184-187, 2008.
- [6] S. A. M. F. C. Scott, «The development of a new Fe-Mn-C austenitic steel for automotive applications,» *La revue de Metallurgie-CIT*, pp. 293-303, 2006.
- [7] A. S. Hamada, «Manufacturing, mechanical properties and corrosion behavior of high- Mn TWIP steels».
- [8] D. R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, tercera edición, 1998.
- [9] W. F. Hosford, *Mechanical Behavior of materials*, Segunda Edición, 2010.
- [10] M. G. Pedreros, *Efecto del cromo en la resistencia a la corrosión de un acero TWIP Fe 22Mn 0.6C*, 2017.
- [11] S. Cunningham, *Effect of substitutional elements of Dynamic Strain Aging*, 1999.
- [12] R. A. L. A. Robert E. Reed-Hill, *Physical Metallurgy Principles*, Cuarta edición, 2009.
- [13] Hill, Dieter y Graw, *Mechanical Metallurgy Third Edition*, 1986.
- [14] Hull y Bacon, *Introduction to Dislocations*, 2001.
- [15] M. Mecánica, Jorge Luis González, México: Limusa, 2003.
- [16] K. V. V.-T. K. S. K. M. P. H. B. A.R. Chinthia, «Role of fracture toughness in impact-abrasion wear,» *Wear*, pp. 430-437, 2019.
- [17] K. L. H. S. Y. J. K. S. K. K. S. K. Junhyeok Eok Park, «J-Integral fracture toughness of High-Mn steels at room and cryogenic temperatures,» *The minerals, metals and materials society and asm internacional 2019*, vol. metallurgical and materials transactions A, 2019.
- [18] A. A. State, «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials».
- [19] M. Medina, *DETERMINACION DE LOS MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN ACEROS TWIP Fe₂₂Mn_{0.6}CxCr*, 2019.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

- [20] F. D. Barbieri, *Efecto del maclado mecánico en la tenacidad a la fractura de un acero TWIP*, 2014.
- [21] J. D. L. F. D. B. Juan R. Donoso, *A common and concise format approach to a key-curve construction for generating crack extension data in C(T) specimens*, 2018.
- [22] J. P. T. J. Zeng Chen, *Estimation of fracture toughness of 16MnDR steel using Master Curve method and Charpy V-notch impact energy*, 2018.
- [23] S. Cunningham, *Effect of substitutional elements on dynamic strain aging in steel*, Department of mining and metallurgical engineering, 1999.
- [24] A. International, *Standard Test Method for Measurement of fracture toughness E1820-20*, 2020.
- [25] Y. Petrov, *On the electron surface of Mn, Ni and Cr, Ni. Mn austenite with different stacking fault energy*, 2005.
- [26] M. D. V. A. N.I. Medvedeva, *First-principles study of the Mn, Al and C distribution and their effect on the stacking fault energies in austenite*, 2010.
- [27] V.-T. K. A. O. S. Curtze, *Thermodynamic modeling of the stacking fault energy of austenitic steels*, 2010.
- [28] J.-P. C. O. B. S. Allain, *Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys*, 2003.
- [29] M. Olsson, *Thermodynamic modeling of the stacking fault energy in austenitic stainless steels*, 2014.

CAPÍTULO 7 ANEXOS

7.1 Cálculos para parámetros de prefisuración

En base a la norma ASTM E1820, es que se debe llevar a cabo la pre grieta por fatiga, esto con el fin de que esta grieta no escape a la dimensión que se desea. Para esto se debe determinar las cargas máximas y mínimas a las que se va a someter la probeta CT.

En primer lugar, en esta investigación se desea obtener la relación:

$$\frac{a_0}{W} = 0.6$$

A continuación, determinar la función polinomial $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ dada por la siguiente ecuación:

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

Para este caso se obtiene $f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 13.6541$, con esta función es posible calcular el factor de intensidad de tensiones máximo posible de aplicar.

$$K_{m\acute{a}x.} = 0,063. \sigma_{YS}$$

Teniéndose $K_{m\acute{a}x} = 31.50 [MPa\sqrt{m}]$, obteniendo así a partir de la siguiente ecuación, la carga máxima

$$K_{aplicado} = \frac{P_{m\acute{a}x.}}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right)$$

Por lo tanto, se obtiene una carga máxima de 3.23[kN] y una carga mínima de 0.32 [kN], con una relación de carga de 0.1 recomendada por la norma, un peak to peak de 2.91[kN] y una carga media de 1.78[kN].

7.2 Cálculo energía falla de apilamiento

El cálculo efectuado a la aleación obtenida de colada y forjado, fue desarrollado a partir de la relación propuesta por Hirth y posteriormente popularizada por Olson y Cohen, en donde se utiliza la siguiente expresión para determinar termodinámicamente la energía de falla de apilamiento:

$$EFA = 2 * \rho_A * (\Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}) + 2 * \rho^{\gamma/\varepsilon} \quad (1)$$

Donde,

$\Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}$: Energía libre de Gibbs necesaria para que se produzca la transformación martensítica.

ρ_A : Densidad superficial de los átomos en los planos { 1 1 1 }.

$\rho^{\gamma/\varepsilon}$: 15 [mJ/m²], energía por unidad de superficie de la interfase { 1 1 1 } entre la fase γ y ε .

De acuerdo a Allain et. al., simplificando el modelo de Olson y Cohen para una aleación Fe-Mn-C, la entalpía libre molar o la energía libre de Gibbs para la transformación martensítica puede escribirse de la siguiente forma:

$$\Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon} = \Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}_{FeMnX} + x_c * \Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}_{FeMnX} + \Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}_{mg} \quad (2)$$

Considerando los modelos de soluciones regulares, $\Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}_{FeMnX}$ es la contribución química a la entalpía molar libre de todos los elementos sustitucionales que participan en la aleación.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

El primer término de la ecuación (2) considera las combinaciones con los elementos aleantes involucrados con la siguiente relación:

$$\Delta G^{Y \rightarrow \varepsilon}_{FeMnX} = \sum_i x_i \Delta G_i^{Y \rightarrow \varepsilon} + x_{Fe}x_{Mn}[C + D(x_{Fe} - x_{Mn})] \quad (3)$$

$$+ x_{Fe}x_{Si}[E + F(x_{Fe} - x_{Si})] + x_{Fe}x_{Cr}[G + H(x_{Fe} - x_{Cr})]$$

$$\Delta G_i^{Y \rightarrow \varepsilon} = A_i + B_i T, \quad i = Fe, Mn, Cr, Si.$$

Para el caso de las composiciones químicas propuestas, las fracciones molares de todos los elementos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7.2.1 Composición química de aleaciones estudiadas.

Elemento	Fracción Molar Fe22Mn0.6C5Cr	Fracción Molar Fe22Mn0.6C10Mn
Fe	0,69850	0,74000
C	0,02950	0,02950
Mn	0,21700	0,21700
Cr	0,05190	0,10000
Si	0,00310	0,00310
Total	1,0	1,09

A continuación, se presentan los parámetros utilizados para los diferentes cálculos:

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Tabla 7.2.2 Parámetros utilizados para el cálculo teórico de la energía de falla de apilamiento.

ρ	$2.94 \times 10^{-5} \text{ mol m}^{-2}$
$\sigma^{\gamma/\varepsilon}$	15 mJ m^{-2}
$\Delta G_{\text{Fe}}^{\gamma/\varepsilon}$	$-2243.38+4.309T \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{Mn}}^{\gamma/\varepsilon}$	$-1000.00+1.123T \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{FeMn}}^{\gamma/\varepsilon}$	$C=2873 \text{ J mol}^{-1}; D=-717 \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{FeMnX/C}}^{\gamma/\varepsilon}$	$A=1246 \text{ J mol}^{-1}; b=24.29 \text{ J mol}^{-1};$ $c=-17175 \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{Cr}}^{\gamma/\varepsilon}$	$1370-10T \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{Si}}^{\gamma/\varepsilon}$	$-560-8T \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{FeSi}}^{\gamma/\varepsilon}$	$E=2850 \text{ J mol}^{-1}; F=3520 \text{ J mol}^{-1}$
$\Delta G_{\text{FeCr}}^{\gamma/\varepsilon}$	$G= 549.87 \text{ J mol}^{-1}; H= 2095$
$\beta^{\gamma} / \mu_{\text{B}}$	$0.7x_{\text{Fe}}+0.62x_{\text{Mn}}-0.64x_{\text{Fe}}x_{\text{Mn}}-4x_{\text{C}}$
$\beta^{\varepsilon} / \mu_{\text{B}}$	$0.62x_{\text{Mn}}-4x_{\text{C}}$

El segundo término de la ecuación (2) considera la influencia de la interacción del carbono con el manganeso con la siguiente relación:

$$x_{\text{C}} \Delta G^{\gamma \rightarrow \varepsilon}_{\text{FeMnX/C}} = 0,0295 * \frac{a}{x_{\text{C}}} (1 - e^{-bx_{\text{C}}}) + cx_{\text{Mn}} \quad (4)$$

Finalmente, el tercer término de la ecuación (2) considera el componente magnético, debido a la temperatura de transición de Nel (paramagnético a anti ferromagnético) para cada fase se tiene:

$$\Delta G_{mg}^{\gamma \rightarrow \epsilon} = G_m^\epsilon - G_m^\gamma \quad (5)$$

Donde,

$$G_m^\vartheta = RT \ln \left(1 + \frac{\beta^\vartheta}{\mu_B} \right) f \left(\frac{T}{T_N^\vartheta} \right)$$

Se tiene que:

β^ϑ : Momento magnético.

T_N^ϑ : Temperatura de transición de Nel de la fase ϑ .

μ_B : Magnetrón de Bohr.

f : función polinomial ajustada (3), que dependiendo si la razón $\left(\frac{T}{T_N^\vartheta} \right) \leq 1$, la función

es $f \left(\frac{T}{T_N^\vartheta} \right) = 1 - \frac{\left[\frac{79\tau^{-1}}{140p} + \frac{474}{497} \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \left(\frac{\tau^3}{6} + \frac{\tau^9}{135} + \frac{\tau^{15}}{600} \right) \right]}{D}$. Ahora si $\left(\frac{T}{T_N^\vartheta} \right) > 1$, la función es

$$f \left(\frac{T}{T_N^\vartheta} \right) = - \frac{\left[\frac{\tau^{-5}}{10} + \frac{\tau^{-15}}{315} + \frac{\tau^{-25}}{1500} \right]}{D}$$

7.3 Cálculos Tenacidad a la fractura

Para el método básico, cada probeta ensayada va a resultar en un punto de la curva R del material, para esto se requiere tener valores de carga y desplazamiento, además de un tamaño de grieta inicial y final.

Para obtener J, se debe calcular de la siguiente forma:

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

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

$$J_{pl} = \frac{A_{pl} \eta_{pl}}{B_n b_0}$$

Para Jel se tiene que K evaluado con el tamaño de grieta inicial es:

$$K = \frac{P}{(BB_n W)^{0.5}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Donde $f\left(\frac{a}{W}\right)$ es un polinomio.

Para Jpl se tiene el parámetro η_{pl} , que equivale a:

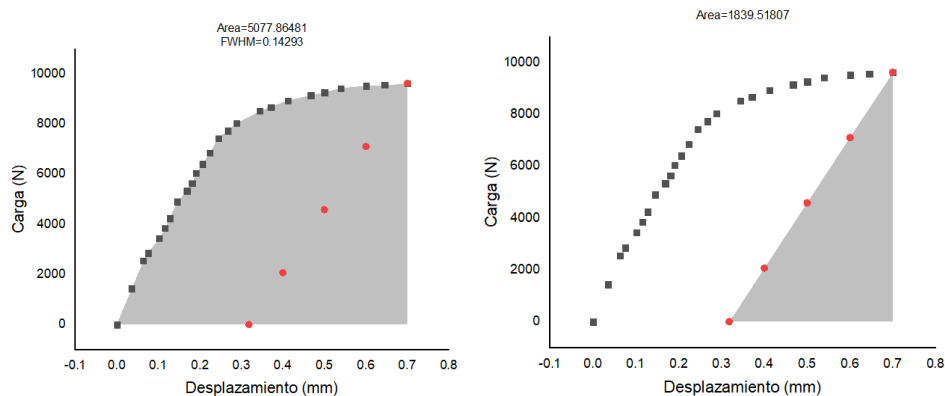
$$\eta_{pl} = 2 + 0.522 \frac{b_0}{W}$$

Se calculan los valores para obtener el Jel de cada probeta

Tabla 7.3.1 Valores de Jel

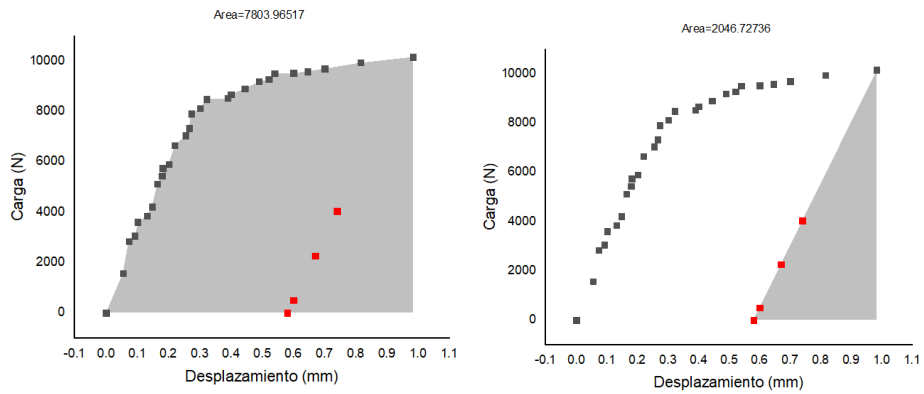
Probeta	Carga final	V [mm]	a_0 [mm]	a_f [mm]	$K[MPa\sqrt{m}]$	$J_{EL}[\text{KJ/m}^2]$
1	9628.192	0.7	24.6	24.63	2467.82	31.49
2	10156	0.983	24.5	24.65	2576.72	34.33
3	10169.82	1.2	24.5	24.82	2580.23	34.42
4	10114.31	1.334	24.3	25.01	2514.95	32.7
5	10000.6	1.4612	24.5	25.33	2537.29	33.29
6	9640.60	1.6429	24.5	25.46	2445.96	30.93
7	9655	1.8239	24.6	25.9	2474.69	31.66

Para el caso del Jpl, se debe considerar solo el área plástica de las curvas de cada probeta, para esto se utiliza el programa Origin, se presentan las curvas a continuación.

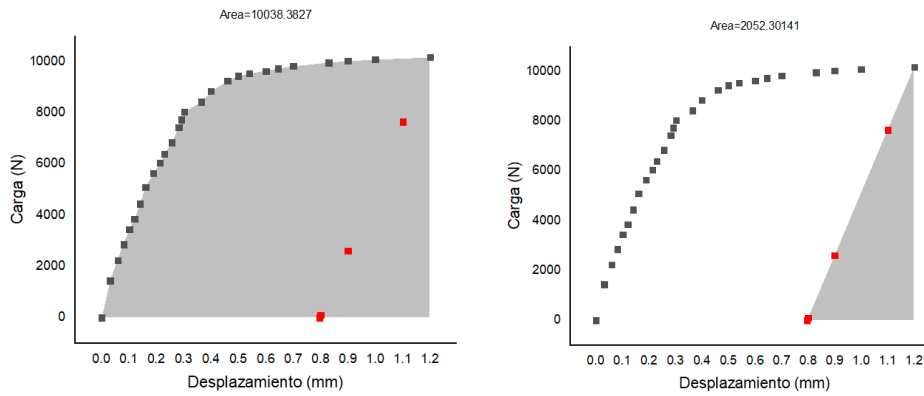


ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

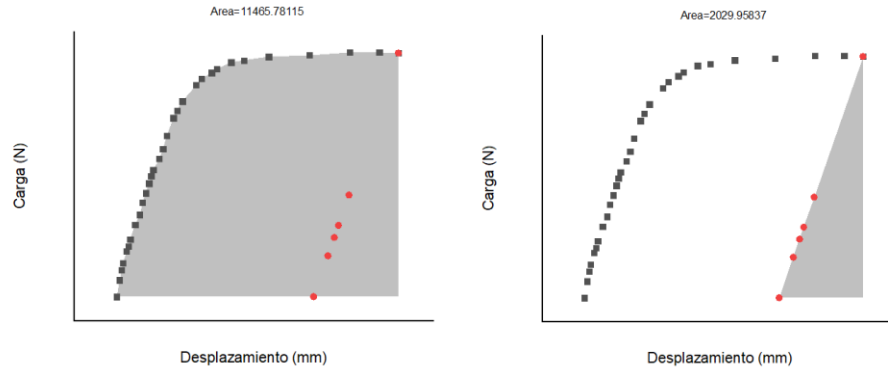
(a) Probeta 1



(b) Probeta 2

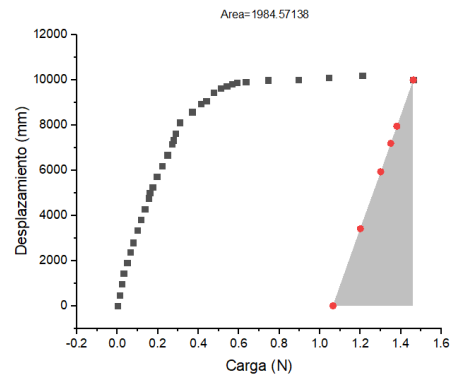
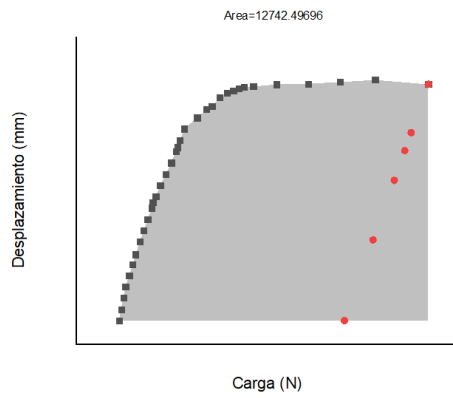


(c) Probeta 3

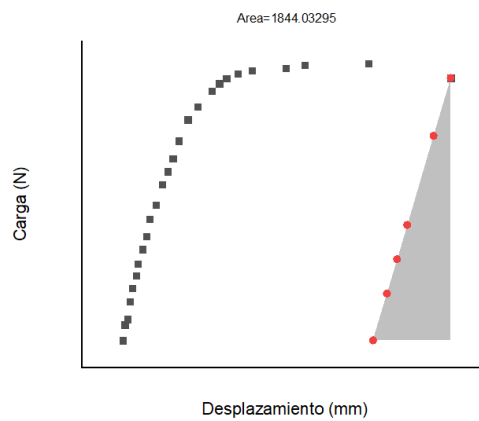
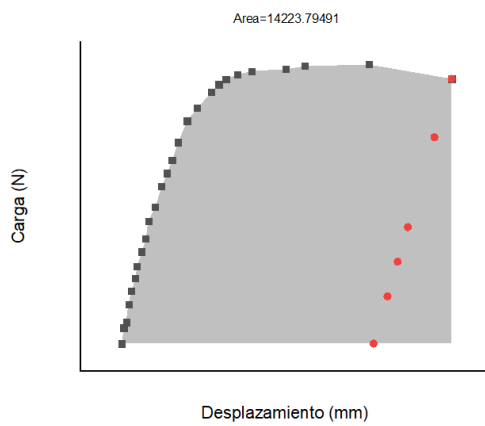


(d) Probeta 4

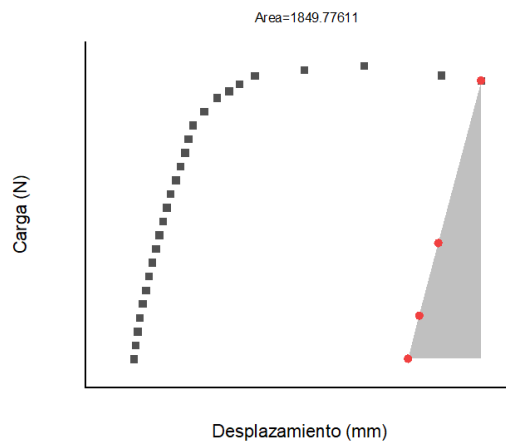
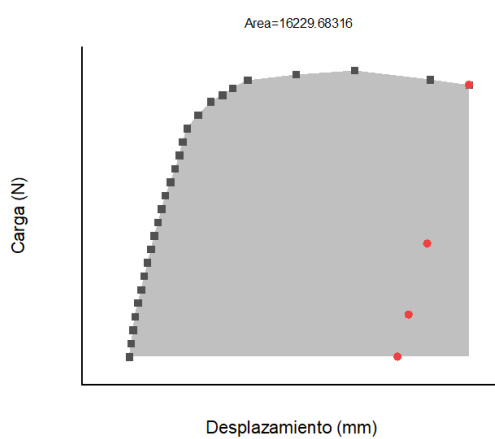
ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr



(e) Probeta 5



(f) Probeta 6



(g) Probeta 7

Figura 7.3.1 Áreas bajo curvas de cada probeta

Finalmente, al obtener el Apl de cada probeta, se realizar el cálculo para obtener el Jpl, y por lo tanto el J total de cada probeta.

ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE LA FRACTURA DE
ACEROS TWIP Fe22Mn0.6CxCr

Tabla 7.3.2 Valores de J, para las distintas probetas

Probeta	Jel [KJ/m ²]	Jpl [KJ/m ²]	Jtotal [KJ/m ²]
1	31.49	42.26	73.75
2	34.33	75.13	109.46
3	34.42	104.23	138.65
4	32.7	123.14	155.84
5	33.29	140.39	173.68
6	30.93	161.56	192.49
7	31.66	187.66	219.32