INFORME FINAL DE TÉSIS

ANÁLISIS DE APLICACIÓN DE UN ACERO MICROALEADO

7/11/2020

Tutor: Nicolás Oyarzabal

Alumnos:Legajos:Rodrigo Aramendi55218Maximo Lambruschini55180



Índice

1.	Res	umen	1
	1.1.	Objetivo	1
	1.2.	Método	1
~	- .		
2.	Intr	oducción 4	ł
	2.1.	Aceros microaleados	ł
	2.2.	Chapa de descuelgue	ł
	2.3.	Fatiga)
	2.4.	Superficie de fractura	3
		2.4.1. Fractura dúctil	3
		2.4.2. Fractura frágil)
	~ ~	2.4.3. Fractura por fatiga)
	2.5.	Inclusiones no metálicas	L
ર	Mat	orial 19)
J.	2 1	Crado 5046))
	0.1.	Glado 5040	2
4.	Equ	ipos 13	3
	4.1.	Máquina para ensavos de fatiga INSTRON 8801	3
	4.2.	Microscopio SEM	1
	4.3.	Máquina de ensavos a tracción INSTRON	3
	4.4.	Fresadora CNC	7
	4.5.	Rectificadora	3
	4.6.	Pulidora)
	4.7.	Durómetro)
	4.8.	Cortadora lenta	L
5.	Prej	paración preliminar 22	2
	5.1.	Inclusiones metalográficas	2
		5.1.1. Preparación de las probetas	2
		5.1.2. Preparación de la resina $\ldots \ldots 22$	2
		5.1.3. Terminación	3
_	-		_
6.	Ens	ayos y resultados 23	3
	6.1.	Ensayo de plegado	3
		$6.1.1. Descripción de la norma \dots 24$	ł
		6.1.2. Ensayo	ł
		$6.1.3. Tintas penetrantes \ldots 26$	j
	6.2.	Fatiga y tracción	3
	6.3.	Análisis de superficie de fractura)
	6.4.	Microscopía óptica	L
		6.4.1. Microestructura	L
		$6.4.2. Inclusiones \dots \dots$	2
		$6.4.3. $ Zona de la fisura $\dots \dots \dots$	3
	6.5.	Dureza	1

7.	Aná	disis de	e elementos finitos	35
	7.1.	Norma	a de diseño	. 35
	7.2.	Modele	lo lineal	. 37
		7.2.1.	Mallado	. 37
		7.2.2.	Condiciones de borde	. 38
		7.2.3.	Aplicación de la carga	. 38
		7.2.4.	Resultados	. 38
	7.3.	Modele	lo no lineal	. 39
		7.3.1.	Mallado	. 40
		7.3.2.	Condiciones de borde	. 40
		7.3.3.	Aplicación de la carga	. 40
		7.3.4.	Resultados	. 41
8.	Con	clusior	nes	43
9.	Bib	liografí	ĩa	45

Índice de figuras

1.	Chapa de descuelgue
2.	Nucleación de fisuras
3.	Fatiga: etapas I y II
4.	Ley de Paris
5.	Etapas de la fractura dúctil
6.	Hoyuelos característicos de una fractura dúctil
7.	Superficie característica de una fractura frágil
8.	Marcas de galón indicando el origen de la falla
9.	Fractura por fatiga
10.	Composición química del grado 5046 13
11.	Módulo hidráulico
12.	Máquina de fatiga
13.	Funcionamiento de un SEM
14.	Modelo Carl Zeiss Evo 10
15.	Máquina de tracción
16.	Mordazas y extensómetro 17
17.	Fresadora CNC
18.	Rectificadora de bandera
19.	Pulidora
20.	Inclusiones pulidas a espejo
21.	Durómetro utilizado
22.	Cortadora Lenta
23.	Cortadora Lenta
24.	Plastificación en la zona de la grieta
25.	Materiales utilizados para incluir la probeta
26.	Esquema del dispositivo
27.	Dispositivo utilizado
28.	Probeta plegada a 90°
29.	Probeta plegada a 90°

30.	Fuente de luz ultravioleta	27
31.	Probeta inspeccionada	27
32.	Curva de respuesta para el acero 5046	28
33.	Fisura en una de las probetas	29
34.	Estrías en la superficie de fractura	29
35.	Estrías	30
36.	Hoyuelos	30
37.	Borde de la falla	31
38.	Microestructura	32
39.	Inclusiones observadas en un corte longitudinal	32
40.	Inclusiones observadas en un corte transversal	33
41.	Vértice de la grieta	33
42.	Esquema de la probeta	34
43.	Perfil de dureza	35
44.	Medidas para el diseño de la chapa	36
45.	Esquema del ensayo	36
46.	Modelado de Solidos	37
47.	Modelo Lineal	38
48.	Tensiones en el modelo Lineal	39
49.	Curvas de los materiales utilizados	40
50.	Modelo no lineal	41
51.	Deformación acumulada para el grado 5046	42
52.	Deformación acumulada para el 304	42
53.	Desplazamiento vs Reacción para ambos materiales	43

1. Resumen

1.1. Objetivo

El fin de este trabajo es analizar la posibilidad de utilizar un acero microaleado como chapa de descuelgue, comparando sus propiedades con los materiales que se utilizan habitualmente en ese contexto.

Se tienen a disposición probetas de un acero 5046 de Ternium. La idea es relevar las propiedades mediante ensayos y estimar, de manera preliminar, si es viable utilizarlo para la fabricación de las chapas mencionadas.

1.2. Método

- Relevamiento de las propiedades del material mediante diversos ensayos (dureza, tracción, plegado, etc.)
- Análisis de superficie de fractura del material al microscopio SEM.
- Uso de microscopía óptica para observar la microestructura y el contenido inclusionario del material.
- Respuesta del material frente a la solicitación, mediante modelado de la chapa por análisis de elementos finitos.

2. Introducción

2.1. Aceros microaleados

Los aceros microaleados, o aceros HSLA (High Strength Low Alloy), son aleaciones metálicas que presentan mejores propiedades mecánicas o mejor resistencia a la corrosión que los aceros comunes. Como su nombre lo indica, esta mejora se debe al agregado de ciertos aleantes en pequeñas cantidades. Mantienen un bajo nivel de carbono, entre 0,05 y 0,25 por ciento, para mantener la conformabilidad y la soldabilidad. Poseen resistencias entre 250 y 590 MPa, y gran tenacidad, por lo que requieren más energía que los aceros comunes para conformarlos.

En la actualidad, estos aceros empiezan a predominar en diversas aplicaciones, ya que logran estructuras resistentes con secciones menores. Se utilizan en autos, camiones, grúas y puentes, entre otras cosas.

2.2. Chapa de descuelgue

Como su nombre lo indica, esta chapa se utiliza en el mundo de la escalada para evitar las caídas. Por lo general se utilizan de a pares. Existen diversos diseños, tanto para interiores como para exteriores.



Figura 1: Chapa de descuelgue

En la **Figura 1** se muestra un ejemplo. Se abulona a la pared o a la roca, con un bulón del mismo material que la chapa. En el agujero grande se ponen mosquetones, y en estos atan la cuerda los escaladores.

Sobretodo en el caso de las chapas para exteriores, el material tiene que subsistir en condiciones adversas. Se utilizan distintos materiales, pero lo más usados son aceros inoxidables (SAE 304 o 316), que tienen un costo más elevado, o aceros galvanizados. Se destacan por sobre otros materiales por tener mayor resistencia a la corrosión, lo cual es imprescindible al escalar en zonas costeras. También deben tener buena resistencia mecánica y buena tenacidad, ya que deben aguantar el impacto generado por las caídas.

2.3. Fatiga

La fatiga consiste en la formación y propagación de grietas a partir de puntos de configuración inadecuada (como concentradores de tensión) o de zonas de apilamiento de dislocaciones en un componente estructural solicitado por tensiones variables, frecuentemente menores a las tensiones de fluencia y de rotura del material.

Los orígenes de la fatiga son las heterogeneidades del material y las intrusiones y extrusiones que forman los planos atómicos dislocados. En la siguiente figura, dividida en tres partes, se pueden observar las tres formas más comunes de nuclear una fisura. En la primera, la fisura se origina a partir del desplazamiento de las bandas de deslizamiento. En la segunda, la fisura se origina en la zona de contacto con una inclusión no metálica. En la tercera, la fisura se origina en los bordes de grano.



Figura 2: Nucleación de fisuras

La propagación de grietas por fatiga puede dividirse en tres etapas:

• 1) Nucleación de fisuras.

Se produce en la superficie de la pieza y en zonas de concentración de tensiones. Se genera deformación plástica localizada hasta que el material endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada.

A medida que se repiten los ciclos, aumenta el endurecimiento y la pérdida de ductilidad, hasta que se produce la iniciación de una fisura que luego actúa como concentrador de tensiones.

En esta primera etapa, la fisura se propaga a 45 grados respecto de la aplicación de la carga. Hay fuerte influencia de la estructura del material.

• 2) Propagación.

La fisura necesita de un campo de tensiones adecuado para propagarse, y se incrementa con cada ciclo de carga. La velocidad de propagación depende de distintos factores: tipo de material, ambiente, etc.

En esta segunda etapa, la fisura se propaga de manera normal a la solicitación, con poca influencia de la estructura del material.

La siguiente figura muestra la etapa de nucleación y fisuración. A la derecha se pueden ver distintas nucleaciones a 45 grados de la aplicación de la carga. La fisura que se propaga, a medida que va creciendo, se va alineando perpendicularmente con la linea de aplicación de la carga.



Figura 3: Fatiga: etapas I y II

3) Rotura.

Se produce cuando la longitud de la grieta compromete la tenacidad a la fractura del material, el K_{Ic} . La relación entre la variación de la longitud de la grieta a y la cantidad de ciclos N de una carga de fatiga viene dada por la Ley de Paris:



Figura 4: Ley de Paris

Cymson constantes que dependen del material. La primera surge de la intersección de la recta extendida en la etapa II con las ordenadas, mientras que la segunda surge de la pendiente de esa recta.

2.4. Superficie de fractura

El análisis de la superficie de fractura de un material permite establecer el modo de falla y el tipo de solicitación al que estaba sujeto. Se distinguen principalmente tres tipos de fractura:

- Fractura dúctil.
- Fractura frágil.
- Fractura por fatiga.

Es importante no confundir fractura con comportamiento. Por ejemplo, un comportamiento dúctil refiere a las grandes deformaciones plásticas que exhibe el material frente a una solicitación, mientras que una fractura dúctil refiere a ciertas características que presenta la superficie una vez fracturado el material.

2.4.1. Fractura dúctil

La fractura dúctil se propaga por el mecanismo de capas de oquedades, y se observa gran deformación plástica. Es una falla predecible, ya que se observa a simple vista la localización de deformaciones antes de la falla.



Figura 5: Etapas de la fractura dúctil

En la **Figura 5** se observan las cinco etapas:

- a) Formación del cuello o necking.
- b) Aparición de hoyuelos alrededor de discontinuidades como inclusiones no metálicas en el material.
- c) Coalescencia de huecos.
- d) Propagación de fisuras.
- e) Fractura.



Figura 6: Hoyuelos característicos de una fractura dúctil

En la **Figura 6** se observan los hoyuelos que caracterizan a la superficie de fractura dúctil. La morfología de los mismos depende del tipo de solicitación.

2.4.2. Fractura frágil

La fractura frágil no presenta deformación plástica y exhibe superficies brillantes. Las fisuras se propagan rápidamente a través de planos atómicos de clivaje de baja energía superficial, y no permite predecir la falla.

La fisura se inicia en concentradores de tensión, en lugares de bloqueo de dislocaciones, generando un estado triaxial de tensiones.

La fractura puede ser transgranular, con una superficie facetada por los planos de clivaje, o intergranular, cuando los bordes de grano presentan fases segregadas.

La **Figura 7** muestra la superficie de una fractura frágil. La fisura se propaga rápidamente por los planos atómicos de clivaje, que tienen baja energía superficial, resultando en esta superficie

con pinceladas.



Figura 7: Superficie característica de una fractura frágil

Las marcas de galón o de Chevron son un indicador característico de la fractura frágil. La orientación de las marcas apunta al origen de la falla. Esto puede observarse en la **Figura 8**.



Figura 8: Marcas de galón indicando el origen de la falla.

2.4.3. Fractura por fatiga

Este tipo de fractura tiene características propias que la diferencian de las dúctiles y frágiles. Los mecanismos que la producen también son diferentes, y se explicaron en la sección **2.1**.

La superficie de fractura presenta un foco de inicio de la fisura. Luego se ve una zona de propagación, con las líneas de playa (beach marks) características de este tipo de falla, que apuntan al origen de la fisura. Por último se observa una zona de fractura súbita, perteneciente a la última sección resistente del material (**Figura 9**).



Figura 9: Fractura por fatiga.

2.5. Inclusiones no metálicas

Las inclusiones no metálicas presentan características que las diferencian de otras segundas fases:

- No son fases metálicas. Son enlaces mayormente iónicos o covalentes. Esto influye en la baja cohesión de su fase con la matriz metálica del acero.
- Se forman antes o durante la solidificación del acero, y no como consecuencia de una reacción en estado sólido. Por lo tanto, su distribución no puede ser modificada con tratamientos térmicos, porque la mayoría son insolubles en estado sólido. La única manera de cambiar la distribución es el procesamiento mecánico en caliente, pero puede resultar contraproducente ya que genera anisotropía en el material.
- Como la interfase entre las inclusiones y el acero es de baja cohesión, las mismas se vuelven sitios preferenciales para la nucleación de hoyuelos en el proceso de fractura dúctil.

Se pueden clasificar las inclusiones de acuerdo a su origen:

- Endógenas: cuando vienen de reacciones entre el oxígeno, el azufre y otros elementos.
- Exógenas: cuando provienen de partículas de refractarios o de escoria atrapada en el líquido durante el proceso de fabricación.

También de acuerdo a su tamaño:

- Microinclusiones: cuando su tamaño no supera los 0.1 mm.
- Macroinclusiones: cuando son mayores que 0.1 mm.

En general las microinclusiones son endógenas. Mientras que las macroinclusiones pueden ser endógenas o exógenas.

Por otra parte, se clasifican por la composición química:

- Sulfuros: los más frecuentes son los sulfuros de manganeso (MnS). Existen tres tipos, la aparición de cada uno depende del contenido de oxígeno del acero.
 - Tipo I: predominante cuando la cantidad de oxígeno en el acero es alta (>200 ppm). Estructura: partículas globulares dispersas. Poco deformable, se utiliza para dar maquinabilidad en los aceros serie 1100 y 1200.
 - Tipo II: se forma cuando el contenido de oxígeno es menor a 100 ppm (aceros calmados). Aparecen como grandes colonias eutécticas interdendríticas. Este sulfuro es muy deformable y se alarga mucho en la dirección de laminación del material. Por esta razón, genera mucha anisotropía en las propiedades.
 - Tipo III: se forma cuando el nivel de oxígeno es bajo, y además el acero posee aluminio en exceso o silicio. Aparecen como partículas angulares discretas. También es muy deformable y el trabajado en caliente lo estira, pero su tamaño es menor al de tipo II.
- Óxidos: son pocos los óxidos simples, la mayoría son complejos. Se clasifican en tres grandes grupos:
 - Aluminatos: son inclusiones que aparecen como conglomerados de partículas en la estructura de colada. No son deformables y conservan su forma original, pero se fracturan y se alinean durante la deformación plástica del acero. Crean anisotropía en las propiedades.
 - Silicatos: son fases vítreas. Dependiendo de la temperatura de transición vítrea que tengan pueden resultar deformables o no durante el procesamiento en caliente.
 - Óxidos globulares: contemplan al resto de los óxidos, que por lo general son indeformables y tienen apariencia globular.

3. Material

3.1. Grado 5046

Esta es la especificación de Ternium para este acero laminado en caliente. Está microaleado con Nb, V y Ti, y tiene un contenido inclusionario bajo. De ensayos previos se obtuvieron las propiedades del material: presenta una tensión de fluencia de 530 Mpa y una tensión última de 623 Mpa, con un alargamiento de 25.5 %. [1]

Este acero se usa, por lo general, en estructuras automotrices. Su composición química se muestra en la Figura 10.

ELEMENTO	C 8	Mn 8	P 8	5	Si %	Al %	N (ppm)	Nb %	TI 8
MÍN	0,070	1,15	0,000	0,0000	0,08	0,020	50	0,030	0,010
MÁX	0,090	1,30	0,020	0,0080	0,16	0,060	90	0,042	0,022
AIM	0,000	0,00	0	0,0000	0	0	0	0	0
ELEMENTO	Cu %	Ni %	Cr %	Sn %	Mo 8	Ca (ppm)	Sb (ppm)	8 V	B (ppm)
MÍN	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	10	0,00	0,073	0,00
máx	0,060	0,050	0,045	0,015	0,010	45	0,00	0,085	5,00
AIM	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 10: Composición química del grado 5046

4. Equipos

4.1. Máquina para ensayos de fatiga INSTRON 8801

Todos los ensayos de fatiga realizados fueron hechos con la máquina de fatiga INSTRON 8801. Esta máquina consta de un módulo hidráulico llamado INSTRON 3520 que se muestra en la **Figura 11** que le provee la potencia para realizar la tracción o compresión necesaria para el ensayo. También posee un módulo electrónico que conectado a una PC permite realizar el control de los ensayos y setear los parámetros requeridos para realizarlos. En la **Figura 12** se puede ver la máquina de fatiga junto con el módulo hidráulico a la derecha. El Software utilizado es el INSTRON WAVEMATRIX y el INSTRON MODULE. Para mayores detalles sobre la utilización de la máquina referirse al protocolo respectivo realizado.



Figura 11: Módulo hidráulico



Figura 12: Máquina de fatiga

4.2. Microscopio SEM

El microscopio SEM (Scanning Electron Microscope) utiliza electrones reflejados y dispersados de la superficie de una muestra para crear una imagen.

En la **Figura 13** se muestra un esquema del principio de funcionamiento. Los electrones se generan en la parte superior, con la fuente de electrones, que está sellada en una cámara especial para preservar el vacío y protegerla de contaminación, vibraciones o ruido.

Se utilizan lentes electromagnéticos para controlar el camino del haz de electrones. Son básicamente bobinas que generan un campo magnético cuando se aplica una corriente. Como los electrones son muy sensibles al campo magnético, su recorrido puede desviarse modificando la corriente aplicada a la bobina. A la vez, un lente condensador controla el tamaño del haz, resultando en mayor o menor resolución de la imagen.

Hay dos tipos de electrones:

• Electrones retrodispersados (BSE, backscattered electrons): son los electrones que se reflejan luego de las interacciones elásticas entre el haz y la muestra. Vienen de partes más profundas de la muestra. Electrones secundarios (SE, secondary electrons): son los electrones que aparecen por interacciones inelásticas entre el haz y la muestra, es decir, se originan de los átomos de la muestra. Contienen información de la superficie.

El microscopio posee un detector para cada uno de estos tipos de electrones.



Scanning Electron Microscope

Figura 13: Funcionamiento de un SEM.

El microscopio utilizado en este trabajo es un Carl Zeiss Evo 10 (**Figura 14**). Se redactó un protocolo para su utilización. [2]



Figura 14: Modelo Carl Zeiss Evo 10.

4.3. Máquina de ensayos a tracción INSTRON

La máquina de tracción utilizada es la INSTRON 3382 que se muestra en la **Figura 15**. Fue usada para, mediante un ensayo de tracción, obtener el módulo de elasticidad del material y además fracturar las probetas ensayadas por fatiga para poder realizar posteriormente un análisis de la superficie de fractura.

La máquina esta conectada con una PC que recibe los datos de carga aplicada y mediante un extensómetro colocado sobre la probeta se mide la deformación aplicada. En la **Figura 17** se muestra en detalle el extensómetro colocado sobre la probeta que será ensayada.

Para obtener el módulo de elasticidad se realiza un ensayo de carga desde 0 hasta 15000 N (valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material) en donde se calcula la tensión y se mide la deformación en cada instante. Mediante el cociente de ambos se obtiene un promedio del módulo de elasticidad.



Figura 15: Máquina de tracción



Figura 16: Mordazas y extensómetro

4.4. Fresadora CNC

La fresadora de control numérico utilizada para el mecanizado es la fresadora Haas TM1. Es una fresadora vertical de 3 ejes. Se la puede ver en la siguiente figura:



Figura 17: Fresadora CNC

4.5. Rectificadora

La máquina usada para rectificar las caras de las probetas ensayadas es una rectificadora de bandera, oscilante en la dirección horizontal.



Figura 18: Rectificadora de bandera

La mesa de trabajo es fija y cuenta con un soporte magnético para fijar las piezas a rectificar.

Se utiliza un lubricante para refrigerar la pieza, preservar la piedra esmeril y lograr una superficie con mejor terminación. Se aplica mediante una bomba ubicada en la parte inferior de la máquina, a través de una manguera que se mueve con la herramienta y cubre por completo la superficie a rectificar.

4.6. Pulidora

Se utiliza para pulir a espejo las inclusiones metalográficas de las probetas ensayadas. Como se ve en la **Figura 19** la pulidora cuenta con dos discos rotantes y cada uno cuenta con una canilla para proveer agua a la hora de lijar o pulir. El agua sirve para remover las partículas que se desprenden del material y que no rayen la superficie. El disco de la izquierda es utilizado para colocar papel de lija al agua y el de la derecha se utiliza para pulir la superficie.



Figura 19: Pulidora

Primero se debe lijar con el disco de la izquierda con papel de grado 60 hasta conseguir lijar la superficie completa ya que en un principio la superficie a lijar no es plana. Una vez que se consigue que las lineas que queden sobre la parte metálica de la inclusión estén todas en la misma dirección es cuando se pasa a un papel de mayor grado. Este proceso se debe repetir para los grados 220, 400, 500 y 1200. Cuando se termina de lijar con el papel de mayor grado, en este caso 1200, se pasa a pulir con el disco de la derecha.

Para pulir a espejo además de utilizar agua se debe utilizar alúmina. Este es un líquido que contiene finas partículas que eliminaran las rayas menos visibles que quedaron del proceso de lijado. Las que queden deben ser un orden de magnitud menor que la microestructura que se pretende observar. Se debe pulir hasta conseguir una superficie espejo como se muestra en la **Figura 20**



Figura 20: Inclusiones pulidas a espejo

4.7. Durómetro

Se utiliza para medir la dureza de las probetas ensayadas. Se realiza una indentación sobre la superficie a estudiar. Con el valor de la fuerza aplicada para realizar esa indentación y el tamaño de la misma se obtiene el valor de dureza. Este se encuentra en dureza Vickers (HV).



Figura 21: Durómetro utilizado

4.8. Cortadora lenta

En las **Figuras 22** y **23** se muestra la cortadora lenta utilizada para cortar las probetas que luego se incluyeron en resina. Este sistema tiene un peso que apoya la pieza contra el disco que gira. Este último tiene una batea de lubricante en la parte de abajo, por lo que el borde posee siempre una capa de lubricante de manera a refrigerar la pieza en todo momento.

Este método de corte se utiliza para evitar que la pieza levante temperatura en el proceso y se modifique su estructura metalográfica.



Figura 22: Cortadora Lenta



Figura 23: Cortadora Lenta

5. Preparación preliminar

En esta sección se muestra la preparación de muestras para incluir en resina.

5.1. Inclusiones metalográficas

Para la confección de una inclusión metalográfica en este caso se necesita la sección de la probeta en donde se haya originado la fisura, una resina autocurable y un corte de tubo PVC, en donde se colocará la sección de probeta y se verterá la resina.

5.1.1. Preparación de las probetas

Para la realización de una inclusión metalográfica, la superficie que se va a estudiar en el microscopio debe ser plana. Esto presenta un problema, ya que cuando se produce la fisura en el ensayo de fatiga, se produce una depresión en la zona de falla. En la **figura 24** se muestra la depresión que se genera alrededor de donde se origina la fisura.



Figura 24: Plastificación en la zona de la grieta

Para eliminar la depresión producida se debe rectificar la cara de la probeta que se va a estudiar con la rectificadora referida en la sección 4.5.

Una vez rectificada la superficie, se debe cortar con un serrucho de mano la parte de la probeta necesaria. Para realizar esto se utiliza el diámetro del tubo PVC como modelo para la longitud máxima a cortar.

5.1.2. Preparación de la resina

Para la preparación de la resina se utilizó polímero acrílico autocurable mezclado hasta la saturación.



Figura 25: Materiales utilizados para incluir la probeta

Una vez mezclados el líquido y el polímero hasta la saturación, se obtiene un liquido viscoso. Con la sección de la probeta dentro del tubo, se vierte la resina en estado líquido y se deja curar por aproximadamente 30 minutos hasta que endurezca.

5.1.3. Terminación

Una vez endurecida la resina se pasa a la etapa de terminación, en la cual se pule a espejo la superficie metálica a analizar como se muestra en la sección 4.6.

6. Ensayos y resultados

6.1. Ensayo de plegado

Como se dijo anteriormente, es necesario realizar ensayos de plegado para comprobar que este acero resista el proceso de fabricación. Éstos se realizan bajo la norma ASTM E290-97a.

6.1.1. Descripción de la norma

Esta norma establece un criterio de evaluación para al ductilidad de los materiales. En inglés se denomina *guided bending*, ya que es similar a un ensayo de flexión, solo que la probeta es contenida entre los rodillos de apoyo para lograr un ángulo y radio de pliegue determinados.

Hay diferentes arreglos para realizar el ensayo. En este trabajo, se utilizará el *guided-bend*, es decir, flexión a tres puntas. El esquema del dispositivo se muestra en la **Figura 26**.



Figura 26: Esquema del dispositivo

El esquema también muestra una recomendación para la distancia entre los apoyos C, siendo r el radio del mandril y t el espesor de la probeta.

El objetivo de este ensayo es plegar el material hasta el ángulo deseado, y verificar, a simple vista, que no se produzcan fisuras considerables en la zona deformada.

6.1.2. Ensayo

Las chapas de descuelgue, por lo general, poseen un ángulo de 90° (puede variar ligeramente según el diseño). Por lo tanto, la idea es verificar que las probetas de este acero pueden resistir un plegado de ese ángulo sin tener fisuras evidentes.



Figura 27: Dispositivo utilizado

En la **Figura 27** se observa el dispositivo utilizado. El cilindro del mandril tiene un radio de 5 mm, por lo cual la distancia entre apoyos recomendada resulto ser de 23.5 mm con una tolerancia de 2.25 mm. No obstante, por las dimensiones del dispositivo, y dado que la norma permite estas licencias, se decidió tomar una distancia de 40 mm entre los apoyos.



Figura 28: Probeta plegada
a 90°



Figura 29: Probeta plegada a 90°

Las **Figuras 28** y **29** muestran algunos de los resultados. No se observan fisuras a simple vista en el área deformada. Para un análisis más exhaustivo, se utilizarán técnicas de ensayos no destructivos para comprobar si hay fisuras ocultas al ojo desnudo.

6.1.3. Tintas penetrantes

Las tintas penetrantes son una técnica de ensayos no destructivos para tratar de encontrar fisuras superficiales en el material. Se utilizaron en este caso para verificar fisuras en las probetas luego de los ensayos de plegado.

El método consiste en aplicar un aerosol con tintas que penetran la fisura por capilaridad. Se esperan cinco minutos, se limpia la superficie para remover el líquido en exceso y se aplica un revelador. Si hubiera una fisura, el revelador interactúa con las tintas dentro de la misma, generando una indicación visual. En este caso, las partículas utilizadas son fluorescentes, por lo que se utiliza una luz ultravioleta para evidenciar las fisuras presentes. En la **Figura 30** se observan los equipos utilizados.

De las tres probetas analizadas, ninguna presentó fisuras superficiales en la zona plegada, lo cual indica que el material tolera bien un plegado a 90° . Puede observarse una de las probetas en la **Figura 31**.



Figura 30: Fuente de luz ultravioleta



Figura 31: Probeta inspeccionada

6.2. Fatiga y tracción

Se tomaron los resultados de ensayos de fatiga de un trabajo previo. Como se dijo anteriormente, se realizaron ensayos de fatiga adicionales para hacer un análisis de la superficie de fractura. Estos ensayos se configuraron de forma tal que cuando comienza la propagación inestable de la fisura, el ensayo se detiene. De esta forma se buscó poder observar, por medio de ataques metalográficos, lo que ocurre en el vértice de la fisura.



Figura 32: Curva de respuesta para el acero 5046

La **Figura 32** muestra la curva de respuesta para el acero. En el caso de una chapa de descuelgue, tanto la frecuencia como las tensiones de la solicitación dinámica son bajas. No obstante, la combinación de modos de falla, como corrosión-fatiga, pueden hacer que el material falle prematuramente. Es por eso que, en caso de tener las propiedades adecuadas, el material de estudio estaría pensado para chapas de descuelgue de interiores.

En la **Figura 33** se observa una probeta fisurada como resultado de un ensayo de fatiga. Se ve claramente el vértice de la grieta. Esto genera una depresión en la superficie de la muestra y dificulta el pulido metalográfico necesario para su observación. Por este motivo, las muestras fueron rectificadas luego del ensayo.



Figura 33: Fisura en una de las probetas

Se decidió terminar de romper las probetas utilizando la máquina de tracción, simulando un modo de falla de tipo I.

6.3. Análisis de superficie de fractura

Una vez fracturada la probeta, se analizó la superficie de fractura en el microscopio SEM, con el objetivo de identificar las zonas correspondientes a una fractura dúctil y a una fractura por fatiga, que deberían resaltar dado el proceso de falla que se eligió para las probetas.



Figura 34: Estrías en la superficie de fractura



Figura 35: Estrías

Las **Figuras 34 y 35** muestran la parte izquierda de la superficie de fractura. Se observan las estrías características de una fractura por fatiga, y las flechas indican la dirección que tienen, convergiendo al borde de la probeta en el cual se originó la falla.



Figura 36: Hoyuelos

La **Figura 36** presenta la parte derecha de la superficie, correspondiente a la sección remanente de la probeta que se rompió a tracción, con los hoyuelos típicos que genera el mecanismo de propagación por capa de oquedades en una fractura dúctil. Esta fractura es consistente con la

teoría: una falla por tracción estática en un acero de muy bajo carbono produce este tipo de superficies de fractura.



Figura 37: Borde de la falla

En la **Figura 37** se observa la falla final: el desgarro del material en el borde de la probeta, inclinado a 45 grados. Esto se vio en la **sección 2.2.1**, en ese ángulo se produce la máxima tensión de corte, según lo predice la ley de Schmid.

6.4. Microscopía óptica

6.4.1. Microestructura

Este acero posee una estructura principalmente ferrítica. Se le han agregado ciertos aleantes, como Al, Nb y Ti para controlar el crecimiento de grano en el laminado en caliente. El tamaño de grano, según la norma IRAM-IAS-U-500-122 es TG10, lo cual indica un tamaño de grano fino.

Se atacaron las muestras incluidas en resina utilizando Nital concentrado al 2% para revelar la microestructura. Los resultados se observan en la **Figura 38**. Se pueden observar los precipitados en borde de grano.



Figura 38: Microestructura

6.4.2. Inclusiones

En esta sección se detallará la identificación de inclusiones no metálicas encontradas, empleando la norma IRAM-IAS-U-500-126. Esta última establece un criterio de comparación contra láminas de cinco niveles inclusionarios diferentes: 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5, separadas en serie fina y serie gruesa.



Figura 39: Inclusiones observadas en un corte longitudinal



Figura 40: Inclusiones observadas en un corte transversal

En la **Figura 39** se observan inclusiones encontradas en un corte transversal mientras que en la **Figura 40** se observan las inclusiones encontradas en un corte longitudinal con el microscopio. La morfología que presentan corresponde a óxidos globulares. Las probetas observadas contienen un nivel de entre 1.5 y 2 para la serie fina, y entre 0.5 y 1 para la serie gruesa, lo cual indica un contenido inclusionario intermedio, coherente con el nivel de limpieza exigido para este acero.

6.4.3. Zona de la fisura

Se decidió aprovechar el uso del microscopio óptico para obtener un detalle del vértice de la grieta. Puede observarse en la **Figura 41**.



Figura 41: Vértice de la grieta

6.5. Dureza

Para medir la dureza, se utilizó el durómetro mencionado anteriormente, y se siguieron las especificaciones de la norma ASTM E384-17, puliendo la superficie y respetando el espacio entre las indentaciones, con una carga de 1 kgf.

El valor promedio obtenido para el material es de 198 HV, una dureza baja, pero mayor que los valores de aceros de muy bajo carbono, debido a ciertos componentes de aleación como el manganeso y el vanadio, que imparten mayor dureza al acero.

Para complementar estos resultados, también se midió la dureza en la zona deformada de las probetas que fueron plegadas. Se tomaron dos áreas: la del plegado y una más alejada, para ver cómo varía el perfil de dureza. En la **Figura 42** se muestran las zonas mencionadas.



Figura 42: Esquema de la probeta

En estas áreas, se tomaron mediciones en la línea neutra, en el borde externo, y en el borde interno, tomando valores intermedios. Se muestran los resultados en el gráfico de la **Figura 43**.



Figura 43: Perfil de dureza

Se observa un mayor endurecimiento en la zona del plegado, debido a la deformación en frío. Por otra parte, se observa un aumento de la dureza en dirección del espesor, siendo mayor en la superficie de la chapa respecto del centro de la misma.

7. Análisis de elementos finitos

Para complementar este trabajo, se decidió hacer un análisis de elementos finitos con un modelo de la chapa, para ver a qué solicitaciones estará expuesto el material, y entender si esta configuración de diseño y material satisface los requerimientos de las normas.

7.1. Norma de diseño

La norma utilizada para el diseño de estas chapas es la norma BS EN 959:2007, que certifica el uso de equipos de montaña. En la **Figura 44** se especifican las medidas de diseño. El radio R debe ser de 10 mm como mínimo.



Figura 44: Medidas para el diseño de la chapa

Siguiendo estas instrucciones, se diseñó la pieza teniendo en cuenta las restricciones de la norma y tomando como referencia diseños de otros fabricantes.

La norma también especifica el ensayo al cual debe someterse la chapa para obtener la certificación. La chapa debe abulonarse a un bloque de concreto, cuyas dimensiones mínimas son 200x200x200 (en mm) y se debe tirar de la misma con una carga de 25 kN, sin que se salga del bloque o se rompa, permitiéndose deformación permanente. En la **Figura 45** se observa un esquema del ensayo.



Key

- 1 Eye (clip) of the rock anchor
- 2 Clamp
- 3 Concrete block
- 4 Support over total width
- a Distance of rock anchor
- 1 Installed length



7.2. Modelo lineal

Se hizo el modelado de la pieza en CATIA y se pasó al Siemens NX para el análisis de elementos finitos. El modelo tiene en cuenta la presencia del bloque de cemento y la conexión abulonada entre éste y la chapa. En la **Figura 46** se observa el modelado de los solidos.

Hipótesis para este modelo:

- Pequeños desplazamientos y pequeñas deformaciones.
- Material elástico.



Figura 46: Modelado de Solidos

7.2.1. Mallado

En este modelo tanto la chapa como el bloque de cemento se mallaron con elementos TETRA10. Las mallas utilizadas se muestran en la **Figura 47**.

Para los elementos que componen la chapa se utilizó un modulo de elasticidad de 200 GPa. Para los elementos que componen el bloque se utilizó un modulo de elasticidad de 30 GPa. En ambos casos se utilizó un coeficiente de Poisson de 0.3.

Para modelar la conexión abulonada se utiliza un elemento viga ubicado en el centro del agujero, unido a la chapa y a la pared mediante rigid links.

7.2.2. Condiciones de borde

Se fijaron todos los nodos exteriores de los extremos horizontales del bloque de cemento en las 3 direcciones.

Entre el bloque de cemento y la chapa se aplicó una condición de contacto que introduce esfuerzos en los nodos superficiales para que las mallas no se atraviesen.

7.2.3. Aplicación de la carga

Tal como indica la norma del ensayo, se aplicó una carga de 25 KN en la chapa. La carga tiene una distribución cuadrática para tener en cuenta el contacto entre el mosquetón y la chapa. En la **Figura 47** se puede observar el lugar de aplicación junto con el mallado y la condición de contacto mencionada.



Figura 47: Modelo Lineal

7.2.4. Resultados

En la **Figura 48** se pueden observar las tensiones de Von Mises obtenidas. No se tiene en cuenta la zona de aplicación de carga ni tampoco la zona de conexión entre la chapa y el elemento viga ya que se generan concentraciones de tensión (debido a los rigid links) que no ocurren en la realidad.



Figura 48: Tensiones en el modelo Lineal

Se puede notar una fuerte concentración de tensiones sobre uno de los radios del agujero en donde se aplica la carga sobrepasando los 2500 MPa. Estos valores están muy por encima de la tensión de fluencia, por lo que debe hacerse un análisis no lineal en donde se tenga en cuenta la plastificación del material.

7.3. Modelo no lineal

Para este modelo, se utilizaron tanto el Siemens NX como el ADINA para hacer el análisis de elementos finitos. En la **Figura 50** se muestra el modelo.

Hipótesis para este modelo:

- Grandes desplazamientos y grandes deformaciones.
- Material bilineal. Se aproxima la curva tensión deformación del mismo con dos pendientes, una para el régimen elástico y otra para el régimen plástico utilizando la tensión de fluencia y la tensión última. En la Figura 49 se muestran las curvas utilizadas para el acero 5046 y el 304, a modo de comparación.



Figura 49: Curvas de los materiales utilizados

7.3.1. Mallado

En este caso, se decidió utilizar una malla de elementos HEXA8, visto que logran una mejor convergencia en problemas que requieren varias iteraciones.

Al modelar el bulón y el gancho, debieron incorporarse algunos elementos barra, a manera de evitar que la chapa gire o se traslade libremente.

7.3.2. Condiciones de borde

Para este modelo, se consideraron los contactos del gancho y del bulón con la chapa, dado que interesa observar la deformación en estas zonas. Asimismo, se impuso un desplazamiento hacia adentro alrededor del bulón para simular la precarga, permitiéndose la rotación de la chapa respecto del bulón.

Todos los nodos que conforman la malla de la pared y el vástago del bulón tienen todos sus grados de libertad restringidos.

7.3.3. Aplicación de la carga

Como se mencionó anteriormente, se simuló en este caso el contacto entre el gancho y la chapa. Se impuso un desplazamiento en un nodo, unido por rigid links al gancho, para mover a este último y tirar de la chapa. Se ajustó el valor del desplazamiento hasta conseguir una reacción de 25 kN, equivalente a la carga del ensayo que pide la norma.



Figura 50: Modelo no lineal

7.3.4. Resultados

Para poder realizar una comparación, se registraron los resultados del análisis de elementos finitos para dos materiales: el 304, material utilizado para fabricar las chapas comerciales, y el grado 5046, el acero caracterizado en este trabajo.

Para el 304, se tomó una deformación máxima permitida del 50 %, correspondiente al punto de tensión última. En el caso del 5046, se promedió un valor del 15 %, a partir del historial de ensayos documentados por Ternium.



Figura 51: Deformación acumulada para el grado 5046

En la **Figura 51** se muestra la deformación acumulada para el acero 5046. Se evidencian dos secciones en rojo, que presentan valores de deformación superiores al 20%.



Figura 52: Deformación acumulada para el 304

En la **Figura 52** se muestra la deformación acumulada para el acero 304. Se observa una reducción en la superficie que supera la deformación máxima permitida del 50 % para este caso.



Figura 53: Desplazamiento vs Reacción para ambos materiales

En la figura **Figura 53** se muestra un gráfico de desplazamiento contra carga. Se puede observar que el área bajo la curva correspondiente al 304 es mayor. Esto se traduce en una mayor cantidad de energía disipada en el ensayo de este acero, que requiere un mayor desplazamiento impuesto para lograr la misma carga, al tener mayor capacidad para deformarse. En el caso del 5046, que tiene menor ductilidad, se observan secciones más comprometidas, pese a tener niveles de resistencia similares al 304.

8. Conclusiones

- Los ensayos de plegado en estos aceros demuestran que este material puede someterse al proceso de fabricación de chapas de descuelgue. Gracias al muy bajo contenido de carbono logran mantener la conformabilidad necesaria para este proceso.
- Los aleantes en pequeñas cantidades mejoran las propiedades del material:
 - Existe una sinergia en el agregado de Mn (que fortalece la ferrita), Al, Nb y Ti. Estos últimos funcionan como refinadores de grano al precipitar como partículas finamente distribuidas. Por lo tanto, pese a ser laminado en caliente, este acero mantiene un tamaño de grano fino, lo cual eleva su límite de fluencia y aumenta su tenacidad.
 - Este acero posee una dureza mayor que uno tradicional con contenidos similares de carbono. Algunos aleantes, como el Nb, Ti, y V, forman carburos que elevan la resistencia mecánica y la dureza del material.

No obstante, el contenido inclusionario de este acero no es despreciable, sobretodo por la presencia de óxidos. Esto puede generar anisotropía en el material, y reducir su tenacidad y ductilidad.

- El estudio de concentración de tensiones, propagación de fisuras y posterior rotura del material bajo solicitación de modo I demostraron que las grietas se propagan de manera dúctil, y la superficie de fractura observada confirma ese trabajo preliminar. La ductilidad de este acero permite fallas "deseables", es decir, predecibles y no súbitas.
- Si bien este acero posee algunos aleantes que pueden mejorar la resistencia a la corrosión, no es recomendable exponerlo a medios corrosivos.
- Mediante los análisis de elementos finitos expuestos, se demostró que este acero no posee los niveles de deformación que requiere la solicitación especificada en la norma. No será posible obtener la certificación de carga que otorga la norma BS EN 959:2007.

En síntesis, este acero posee mayor resistencia mecánica y dureza que un acero con el mismo nivel de carbono, manteniendo a la vez una buena tenacidad y ductilidad. Sin embargo, no aventaja de ninguna manera a los materiales utilizados para fabricar estas chapas, como el 304, cuya gran ductilidad permite tolerar las solicitaciones especificadas por la norma.

Como extensión del modelo, se adjuntan algunas propuestas para futuros trabajos:

- En caso de fabricar la pieza, realizar el ensayo de tracción que especifica la norma BS EN 959:2007, de manera a certificar la carga que aguanta la chapa.
- Considerar la opción de un galvanizado para mejorar la resistencia a la corrosión del acero.
- Realizar un ensayo de impacto para evaluar la tenacidad de este acero.

9. Bibliografía

- ASTM Designation: E290-97a, 1997, Standard Test Method for Bend Testing of Material for Ductility
- Norma IRAM: IRAM-IAS-U-500-122. Identificación de tamaño de grano.
- Norma IRAM: IRAM-IAS-U-500-126. Identificación de inclusiones.
- ASTM Designation: E384-17, 2017, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials
- British Standard Designation BS EN 959:2007, 2007, Mountaineering equipment Rock anchors - Safety requirements and test methods
- Rodolfo E. Arias (2016). Determinación de la vida en fatiga en aceros de media y alta resistencia (Proyecto Final). ITBA, Buenos Aires, Argentina.
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2011). Shigley's mechanical engineering design. New York: McGraw-Hill.