

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL
ENSAYO DE TRACCIÓN EN ACEROS DE BAJO CARBONO
LAMINADOS EN CALIENTE”**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Alfredo Yong Pasco

ASESOR:

Anibal Freddy Rozas Gallegos

Lima, Octubre del 2020

Resumen

En el presente trabajo se estudió la influencia de los parámetros del ensayo de tracción en los resultados obtenidos para aceros de bajo carbono laminado en caliente.

Los parámetros de ensayo son la velocidad de ensayo (controlada por la velocidad de separación de las mordazas o por la velocidad de deformación), la temperatura de ensayo dentro de rangos típicos de variación ambiental y la geometría de la probeta; los resultados estudiados son el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo a la tracción y el alargamiento, así como el material empleado fue el acero ASTM A36.

Los parámetros de ensayo están dentro de rangos especificados por las normas ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M - 16a e ISO 6892-1:2016, las cuales establecen las condiciones para que los resultados sean repetitivos y reproducibles. Sin embargo, en el presente estudio se ha encontrado evidencia de que, aun respetando las exigencias de las normas de ensayo, los resultados obtenidos varían.

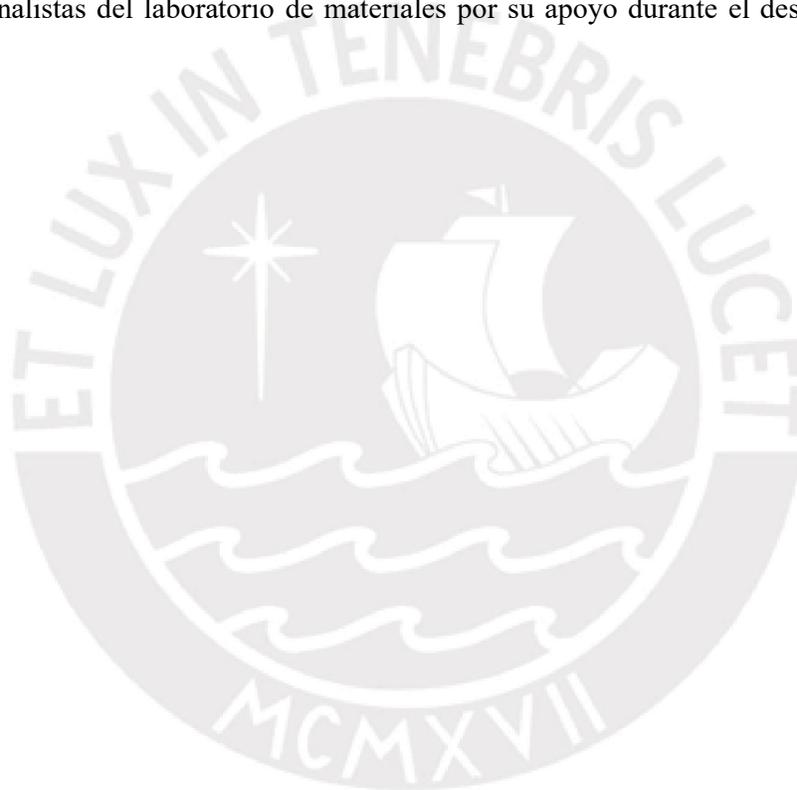
En el primer capítulo se proporcionará un enfoque global del ensayo de tracción según las normas anteriormente mencionadas en consideración de una serie de parámetros de ensayo que definen el comportamiento del material de estudio al ser traccionado. En el segundo capítulo se detallará el procedimiento seguido para el ensayo de tracción y en el tercer capítulo se procederá a mostrar y analizar los resultados obtenidos en la campaña experimental realizada en el presente trabajo.

Luego de realizada la campaña experimental se encontraron variaciones porcentuales en las propiedades estudiadas teniendo una máxima variación de 21%, lo que comprueba que, aun respetando las exigencias de las normas de ensayo los resultados obtenidos varían.

Agradacimientos

Agradezco a Dios y a mi familia que me apoyó durante el desarrollo de mi etapa universitaria, en especial a mi madre y mis tíos maternos. Aprendí en esta etapa que todas las metas propuestas son realizables en la medida que uno se esfuerce y que la familia es nuestro bien máspreciado.

Asimismo, agradezco a mi asesor por el tiempo invertido y su ayuda, así como también a todos los analistas del laboratorio de materiales por su apoyo durante el desarrollo de los ensayos.



ÍNDICE

Introducción.....	1
1. Fundamentos teóricos	4
1.1. Los aceros	4
1.2. Aceros de bajo carbono.....	4
1.3. Laminación	4
1.4. El ensayo de tracción.....	5
1.5. Sociedad americana de metales - Manual de ensayos para materiales metálicos, volumen 8 – Ensayos mecánicos y evaluación.....	6
1.6. Norma ASTM E8/E8M – 16a	8
1.6.1. Método A – Tasa de esfuerzos	8
1.6.2. Método B – Control de tasa de deformación	8
1.6.3. Método C – Control de velocidad de mordazas	8
1.7. Norma ASTM A370 - 19	9
1.8. Norma ISO 6892-1:2016.....	10
1.8.1. Método A.....	10
1.8.1.1. Método A1	10
1.8.1.2. Método A2	11
1.8.2. Método B.....	11
1.9. Influencia de los parámetros de ensayo	13
1.9.1. ESTUDIO 1: Efecto de la temperatura, la velocidad de deformación y la microestructura en el comportamiento mecánico de TiAl. [17]	13
1.9.2. Estudio 2: Sensibilidad a la velocidad de deformación de aceros laminados en caliente. [28]	17
1.9.3. Estudio 3: Investigación de la influencia de la geometría de la probeta en los resultados de la prueba de tracción para diferentes tasas de deformación. [29].....	20
1.9.4. Estudio 4: Efecto del tamaño de probeta y orientación en la resistencia a la tracción y la tenacidad a la fractura. [31].....	25
1.9.5. Estudio 5: Caracterización numérico-experimental de las propiedades mecánicas del acero estructural en un rango amplio de temperaturas. [15].....	28
1.9.6. Estudio 6: Comportamientos de microestructura y deformación de dos aleaciones Mg-Li con doble fase con un incremento de la velocidad de deformación. [18] 32	
2. Metodología de ensayo	34
2.1. Temperatura de ensayo	37
2.1.1. Norma ASTM A370 - 19	37

2.1.2.	Norma ASTM E8/E8M – 16a	37
2.1.3.	Norma ISO 6892-1:2016	37
2.2.	Velocidad de deformación del ensayo	38
2.2.1.	Selección de velocidades de deformación	38
2.3.	Geometría de la probeta	40
2.3.1.	Norma ASTM A370 - 19:	40
2.3.2.	Norma ASTM E8/E8M – 16a:	41
2.3.3.	Norma ISO 6892-1:2016:	42
2.4.	Procedimiento del ensayo	44
2.4.1.	Cálculo de la velocidad de ensayo	44
2.4.2.	Combinaciones de velocidad, temperatura y tamaño de probeta	46
2.4.3.	Número de probetas ensayadas	48
3.	Resultados y análisis de resultados	49
3.1.	Influencia de la velocidad de ensayo: análisis a temperatura constante	60
3.2.	Influencia de la temperatura de ensayo: análisis a velocidad constante	65
3.3.	Influencia de la geometría de la probeta:	69
3.4.	Discusión de resultados y comentarios:	70
3.4.1.	Probetas subsize:	70
3.4.1.1.	Alargamiento:	70
3.4.1.1.1.	Temperatura de ensayo alta:	70
3.4.1.1.2.	Temperatura de ensayo media:	70
3.4.1.1.3.	Temperatura de ensayo baja:	71
3.4.1.1.4.	Velocidad de ensayo alta:	71
3.4.1.1.5.	Velocidad de ensayo media:	71
3.4.1.1.6.	Velocidad de ensayo baja:	71
3.4.2.	Probetas estándar:	72
3.4.2.1.	Esfuerzos:	72
3.4.2.1.1.	Temperatura de ensayo alta:	72
3.4.2.1.2.	Temperatura de ensayo media:	72
3.4.2.1.3.	Temperatura de ensayo baja:	72
3.4.2.1.4.	Velocidad de ensayo alta:	72
3.4.2.1.5.	Velocidad de ensayo media:	73
3.4.2.1.6.	Velocidad de ensayo baja:	73

3.4.2.2.	Alargamiento:	73
3.4.2.2.1.	Temperatura de ensayo alta:	73
3.4.2.2.2.	Temperatura de ensayo media:	73
3.4.2.2.3.	Temperatura de ensayo baja:	74
3.4.2.2.4.	Velocidad de ensayo alta:	74
3.4.2.2.5.	Velocidad de ensayo media:	74
3.4.2.2.6.	Velocidad de ensayo baja:.....	74
3.4.3.	Variación de resultados: temperatura de ensayo y velocidad de ensayo	76
3.4.4.	Variación de resultados: geometría de la probeta.....	79
3.4.5.	Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada: 80	
3.4.5.1.	Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada: Temperatura de ensayo	80
3.4.5.1.1.	Alargamiento	80
3.4.5.1.2.	Esfuerzos.....	81
3.4.5.2.	Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada: Velocidad de ensayo	83
3.4.5.2.1.	Alargamiento	83
3.4.5.2.2.	Esfuerzos.....	84
3.4.5.3.	Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada: Geometría de la probeta	86
3.4.5.3.1.	Alargamiento	86
3.4.5.3.2.	Repetibilidad.....	87
3.4.5.4.	Otros comentarios:.....	89
3.4.5.4.1.	Diferencia en la repetibilidad del esfuerzo y la repetibilidad de la elongación: 89	
3.4.5.4.2.	Repetibilidad:.....	89
3.4.5.4.3.	Sensibilidad a la velocidad de deformación:	89
	CONCLUSIONES	90
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA	92

Introducción

El acero es un material ampliamente usado en la ingeniería. Por ello, se busca mejorar sus propiedades mecánicas, siendo la ciencia y tecnología pieza clave para esta consigna, de manera que se le da una amplia gama de propiedades mecánicas que permite que sea usado en diversas aplicaciones.

El estudio del acero es importante debido a su alta disponibilidad, conformabilidad y sus propiedades mecánicas. Las amplias posibilidades que ofrece el uso del acero se atribuyen principalmente a dos fenómenos metalúrgicos de suma importancia: El hierro es un elemento alotrópico; es decir, que puede tener distintas propiedades, dependiendo de la agrupación de sus átomos (en el caso del hierro, con una configuración cristalina) y el tamaño del átomo de carbono, que es solamente 1/30 el tamaño del átomo de hierro.

Los ensayos de tracción son ampliamente usados para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Estos consisten en someter a una probeta a un esfuerzo axial de tracción. Para realizarlos existen normas que se deben seguir para garantizar la correcta ejecución de estos, se tiene las normas ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M – 16a e ISO 6892-1:2016. Los parámetros usados en ensayos de tracción están dentro de rangos especificados por las normas anteriormente mencionadas, las cuales establecen las condiciones para que los resultados sean repetitivos y reproducibles. Sin embargo, en la norma ASTM E8/E8M – 16a se observa que los resultados obtenidos pueden variar. Este tema es abordado en el punto 9, así como también en el apéndice, sección X1.6.1, sección X1.6.2 y las tablas X1.1, X1.2, X1.3 y X1.4.

El presente trabajo cuantificará la influencia de los parámetros de ensayo en un acero de bajo carbono laminado en caliente, el cual es usado comúnmente en nuestro medio. Los parámetros escogidos son la velocidad de ensayo (controlada por la separación de las mordazas

o por la velocidad de deformación), la geometría de la probeta y la temperatura dentro de rangos típicos de variación ambiental, así como los resultados a analizar son el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo a la tracción y el alargamiento.

Se busca determinar el efecto de la variación de los parámetros del ensayo de tracción sobre las propiedades mecánicas del material de estudio. Para ello, se ensayarán probetas a diferentes condiciones de manera que se obtenga los máximos y mínimos valores, de este modo se tendrán rangos para cada propiedad del material a analizar bajo el cumplimiento de las normas ASTM A370 -19 y ASTM E8/E8M – 16a e ISO 6892-1:2016.

Cabe resaltar que el efecto de la variación de los parámetros de ensayo establecidos bajo las normas técnicas internacionales tiene influencia sobre la aceptación de un producto.

El presente trabajo constará de tres capítulos: el primero proporcionará un enfoque global del ensayo de tracción según normas ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M – 16a e ISO 6892-1:2016, en consideración de una serie de parámetros de ensayo que definen el comportamiento del material de estudio al ser traccionado, así como también se incluyen estudios acerca de dichos parámetros. En el segundo capítulo se detallará el procedimiento seguido para el ensayo de tracción, planteado por las normas ASTM e ISO para la elección de los parámetros, presentando las fórmulas de las principales variables, así como la relación de probetas y combinación de parámetros para cada ensayo a realizar. En el tercer capítulo se procederá a mostrar y analizar los resultados obtenidos de cada ensayo de tal manera que se cumpla con los objetivos de la tesis. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio realizado y la bibliografía.

El objetivo general es analizar la influencia de los parámetros entendidos como velocidad de ensayo, geometría de la probeta y temperatura del ensayo de tracción sobre los resultados de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y alargamiento en los aceros de bajo carbono laminados en caliente de uso estructural de acuerdo a las normas ASTM A370 – 19,

ASTM E8/E8M – 16a e ISO 6892-1:2016.

Los objetivos específicos son:

- Realizar la caracterización del material a ensayar (Microestructura y composición química).
- Analizar la influencia de la temperatura de ensayo sobre la resistencia y ductilidad.
- Analizar la influencia de la velocidad de ensayo sobre la resistencia y ductilidad.
- Analizar la influencia de la geometría de la probeta sobre la resistencia y ductilidad.
- Determinar si es necesario rangos más estrechos en los parámetros establecidos en las normas internacionales más difundidas.



1. Fundamentos teóricos

1.1. Los aceros

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono con concentraciones apreciables de otros elementos. Existen miles de aceros que tienen distintas composiciones y/o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas de estos dependen del contenido de carbono, que suele ser inferior al 1%. Los aceros más comunes se clasifican según el contenido de carbono: aceros de bajo, medio y alto carbono, mientras que el otro grupo corresponde a los aceros aleados, los cuales contienen otros elementos que modifican sus propiedades. Los aceros al carbono sólo contienen concentraciones residuales de impurezas distintas al carbono.

1.2. Aceros de bajo carbono

La mayor parte del acero fabricado es acero de bajo carbono. Este tipo de acero contiene menos de 0.25% de contenido de carbono, no responde al tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y pocos resistentes en comparación a otros, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; además, son de fácil mecanizado, soldables y económicos.

1.3. Laminación

La laminación, es el método de conformación de metales más usado, consiste en pasar una preforma entre un sistema de rodillos. Estos giran, generando presión sobre el material, forzándolo a adaptar cierta forma. La laminación en frío se utiliza para fabricar láminas, cintas y hojas metálicas con acabado superficial de alta calidad. La laminación en caliente es utilizada para fabricar vigas con diferentes perfiles.

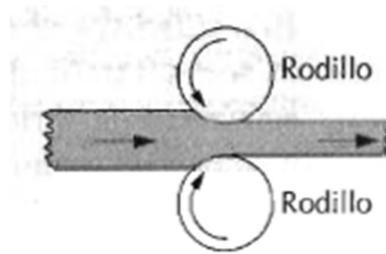


Figura 1: Proceso de laminación [11]

1.4. El ensayo de tracción

El ensayo de tracción es utilizado para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. La probeta es sujeta por los extremos y se deforma hasta la rotura con una carga de tracción que aumenta gradualmente y que es aplicada axialmente a lo largo del eje de la probeta. Durante el ensayo, la deformación está confinada en la región más estrecha del centro, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud.

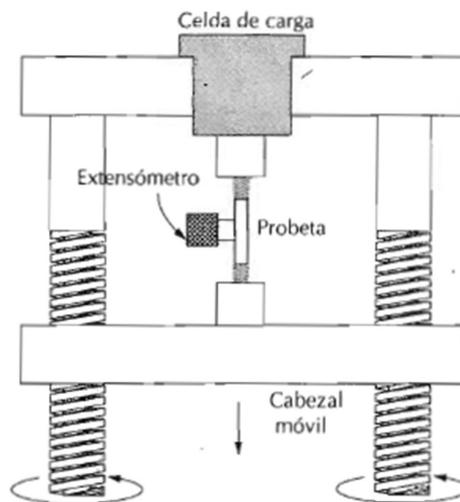


Figura 2: Máquina de ensayo de tracción [11]

1.5. Sociedad americana de metales - Manual de ensayos para materiales metálicos, volumen 8 – Ensayos mecánicos y evaluación

Comportamiento mecánico bajo tensión y compresión:

El comportamiento mecánico de los materiales se describe por su deformación y sus características de fractura al aplicar cargas de tracción, compresión o multiaxiales. La determinación de este comportamiento mecánico está influenciado por varios factores que incluyen variables metalúrgicas, métodos de prueba y naturaleza de los esfuerzos aplicados [1].

Esta investigación [1] se centra en el comportamiento mecánico bajo condiciones de tensión y compresión uniaxial. El principal énfasis está en el comportamiento mecánico durante la prueba de tensión de ingeniería, que se usa ampliamente para proporcionar información de diseño sobre la resistencia de los materiales y como una prueba de aceptación para la especificación de materiales. En este procedimiento de prueba, una muestra está sujeta a una carga (fuerza) uniaxial continuamente creciente, mientras que se hacen observaciones del alargamiento del espécimen.

Efecto de la velocidad de deformación y la temperatura:

La tasa a la que se aplica la tensión tiene una influencia importante en la curva de tensión-deformación. La velocidad de deformación se define como $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$. Se expresa en unidades de s^{-1} . El rango de velocidades de deformación abarcado por varias pruebas se muestra a continuación [1]:

- 10^{-8} a $10^{-5} s^{-1}$: Prueba Creep con carga constante
- 10^{-5} a $10^{-1} s^{-1}$: Prueba de tensión con máquinas hidráulicas o atornilladas
- 10^{-1} a $10^2 s^{-1}$: Pruebas dinámicas de tensión o compresión
- 10^2 a $10^4 s^{-1}$: Prueba de alta velocidad con barras de impacto
- 10^4 a $10^8 s^{-1}$: Impacto de hipervelocidad con pistolas de gas o proyectiles con explosivos

El aumento de la tasa de deformación aumenta la tensión de flujo. Además, la dependencia de la tasa de deformación con la fuerza incrementa aumentando la temperatura. El límite elástico y el esfuerzo de flujo a valores más bajos de la deformación plástica se ven más afectados por la tasa de deformación que la resistencia a la tracción [1].

Si la velocidad de separación de las mordazas de la máquina de prueba es $v = dL / dt$, entonces la tasa de deformación es expresada de la siguiente manera [1]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d(L - L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0}$$

Ecuación 1: Tasa de deformación de ingeniería

La tasa de deformación de ingeniería es proporcional a la velocidad de separación de las mordazas. En una máquina de prueba moderna, en la que la velocidad de separación se puede configurar con precisión y controlar, es una cuestión simple realizar pruebas de tensión a velocidad de deformación de ingeniería constante. La verdadera tasa de deformación está dada por [1]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L}$$

Ecuación 2: Tasa de deformación real

1.6. Norma ASTM E8/E8M – 16a

La norma ASTM E8/E8M – 16a [8] especifica que la velocidad de la prueba debe ser lo suficientemente lenta para permitir que la determinación de cargas y esfuerzos sea aceptable. Para determinar el esfuerzo de tracción, la velocidad de separación de mordazas debe estar comprendida entre 0.05 y 0.5 milímetros por minuto por milímetros de sección reducida. De manera alternativa se puede usar un extensómetro con una velocidad de deformación entre 0.05 y 0.5 mm/mm/min. A continuación, se presentan los 3 métodos para determinar el esfuerzo de fluencia:

1.6.1. Método A – Tasa de esfuerzos

La máquina de tracción debe ser operada con una tasa de esfuerzo dentro de la zona elástica entre 1.15 y 11.5 MPa/s. La velocidad de la máquina no debe ser incrementada para mantener una tasa constante de esfuerzo cuando el espécimen alcanza la fluencia. No se recomienda que el sistema de control de la máquina de tracción funcione utilizando un control de lazo cerrado usando la señal de la fuerza como referencia en el momento en que se produce la fluencia. Sin embargo, el control de lazo cerrado usando la señal de la fuerza como referencia puede ser usado en el rango lineal-elástico del ensayo [8].

1.6.2. Método B – Control de tasa de deformación

La máquina debe de operar en lazo cerrado usando la señal del extensómetro, de manera que esta señal realimente al sistema de lazo cerrado. La tasa de deformación deberá mantenerse en 0.015 ± 0.006 mm/mm/min [8]. Nota: Los sistemas de control de lazo cerrado son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia.

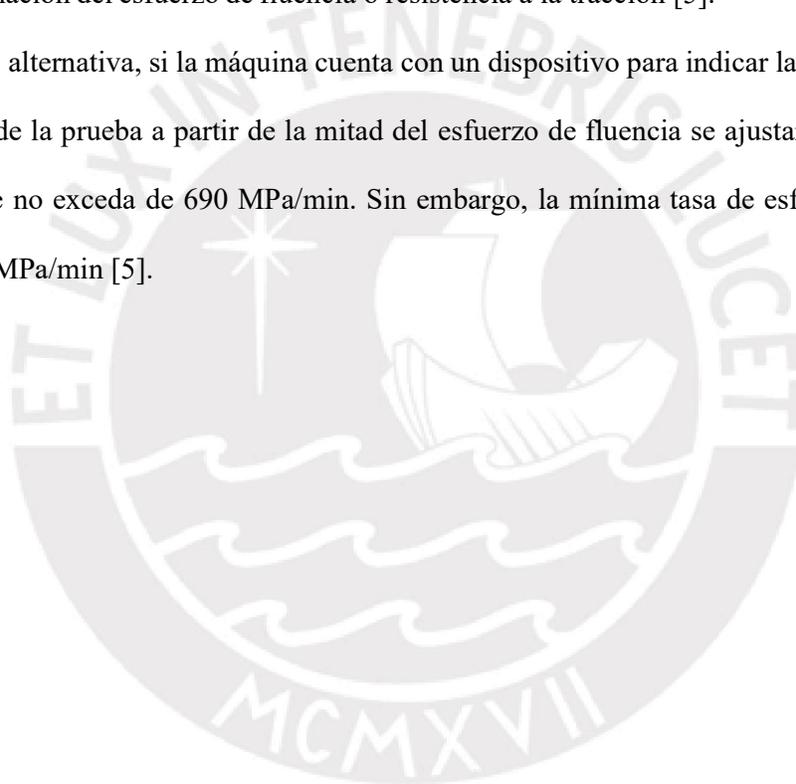
1.6.3. Método C – Control de velocidad de mordazas

La velocidad de separación de mordazas debe estar entre 0.015 ± 0.003 mm/mm/min [8].

1.7. Norma ASTM A370 - 19

Se puede usar cualquier velocidad en el ensayo hasta la mitad del límite elástico. Cuando este punto se alcance, la tasa de separación de mordazas se ajustará de modo que no exceda 1/16 pulgadas por minuto por pulgada de sección reducida. Esta velocidad se mantendrá durante el límite elástico. Para la determinación de la resistencia a la tracción, la tasa de separación de mordazas no excederá de ½ pulgadas por minuto por pulgada de sección reducida. En cualquier caso, la velocidad mínima de prueba no deberá ser inferior a 1/10 de la tasa máxima en la determinación del esfuerzo de fluencia o resistencia a la tracción [5].

Como alternativa, si la máquina cuenta con un dispositivo para indicar la tasa de carga, la velocidad de la prueba a partir de la mitad del esfuerzo de fluencia se ajustará a la tasa de esfuerzos que no exceda de 690 MPa/min. Sin embargo, la mínima tasa de esfuerzo no será inferior a 70 MPa/min [5].



1.8. Norma ISO 6892-1:2016

Establece las tasas de ensayo basado en el control de la tasa de deformación (Método A) y basado en el control de la tasa de esfuerzo durante la región elástica (Método B). Las tasas definidas dependen de los resultados que se desean determinar. A continuación, se dará a conocer los 2 métodos establecidos:

1.8.1. Método A

El método A minimiza la variación de las tasas de prueba durante el momento en el que los parámetros sensibles a las tasas de deformación sean determinados y para reducir al mínimo la incertidumbre de la medición de los resultados de las pruebas. Se describen dos tipos diferentes de control de velocidad de deformación [19]:

1.8.1.1. Método A1

Implica el control de la tasa de deformación en sí, $\dot{\epsilon}_{Le}$, que se basa en la retroalimentación obtenida del extensómetro. Las tasas definidas son las siguientes [19]:

- Para la determinación del esfuerzo de fluencia superior (Re_H), límite elástico convencional (R_p) y límite elástico de extensión total (R_t)

La tasa de deformación, $\dot{\epsilon}_{Le}$, deberá mantenerse lo más constante posible.

Rango 1: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 07\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$.

Rango 2: $\dot{\epsilon}_{Le} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$ (recomendado).

- Para la determinación del esfuerzo de fluencia inferior (Re_L) y el porcentaje de deformación en el punto de fluencia (A_e)

Luego del esfuerzo de fluencia superior, la tasa de deformación estimada sobre la longitud paralela, $\dot{\epsilon}_{Lc}$, se mantendrá en uno de los dos siguientes rangos especificados hasta el término de la fluencia.

Rango 2: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$ (recomendado).

Rango 3: $\dot{\epsilon}_{Lc} = 0,002\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$.

- Para la determinación de la resistencia a la tracción (R_{e_m}), porcentaje de alargamiento después de la rotura (A), porcentaje de alargamiento total en la fuerza máxima (A_{gt}), porcentaje de alargamiento plástico total en la fuerza máxima (A_g) y el porcentaje de reducción de área (Z).

Luego de determinar las propiedades de fluencia, la tasa de deformación estimada sobre la longitud paralela, $\dot{\epsilon}_{LC}$, tomará uno de los dos siguientes rangos especificados:

Rango 2: $\dot{\epsilon}_{LC} = 0,000\ 25\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$

Rango 3: $\dot{\epsilon}_{LC} = 0,002\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$.

Rango 4: $\dot{\epsilon}_{LC} = 0,006\ 7\ s^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$ ($0,4\ min^{-1}$, con una tolerancia relativa de $\pm 20\ %$, recomendado).

1.8.1.2. Método A2

Implica el control de la tasa de deformación estimada sobre la longitud paralela, $\dot{\epsilon}_{LC}$, que se consigue por medio de la velocidad de separación de la mordaza calculada multiplicando la tasa de deformación requerida por la longitud paralela [19].

1.8.2. Método B

Las tasas de pruebas deben cumplir con los siguientes requisitos dependiendo de la naturaleza del material. A menos que se especifique lo contrario, cualquier velocidad de prueba se puede utilizar hasta una tensión equivalente a la mitad del límite de fluencia. Las tasas definidas son las siguientes [19]:

- Para la determinación del esfuerzo de fluencia superior (R_{e_h})

La tasa de separación de las mordazas de la máquina deberá mantenerse lo más constante posible y dentro de los límites que corresponda a las tasas de esfuerzo mostradas en la tabla 1:

Tabla 1: Tasa de esfuerzo [19]

Módulo de elasticidad del material (E) MPa	Tasa de esfuerzo (R) MPa s ⁻¹	
	Mínimo	Máximo
> 150 000	2	20
≥ 150 000	6	60

- Para la determinación del esfuerzo de fluencia inferior (R_{eL})

Solo si se determina el esfuerzo de fluencia inferior, la tasa de deformación deberá estar entre $0,000\ 25\ s^{-1}$ y $0,002\ 5\ s^{-1}$.

- Para la determinación del límite elástico convencional (R_p) y límite elástico de extensión total (R_t)

La tasa de separación de las mordazas de la máquina deberá mantenerse lo más constante posible y dentro de los límites que corresponda a las tasas de esfuerzo mostradas en la tabla 1 para el rango elástico.

- Para la determinación de la resistencia a la tracción (R_m), porcentaje de alargamiento después de la rotura (A), porcentaje de alargamiento total en la fuerza máxima (A_{gt}), porcentaje de alargamiento plástico total en la fuerza máxima (A_g) y el porcentaje de reducción de área (Z).

Luego de determinar las propiedades de fluencia, la tasa de prueba puede incrementarse a una tasa de deformación, equivalente a la tasa de separación de mordazas, no mayor a $0,008\ s^{-1}$. Solo si la resistencia a la tracción del material se va a medir se puede utilizar una tasa de deformación durante toda la prueba que no excederá de $0,008\ s^{-1}$.

1.9. Influencia de los parámetros de ensayo

Como parte del presente estudio, se revisaron y consultaron publicaciones, libros de diferentes autores para ver cómo los parámetros de ensayo influyeron en las propiedades de diferentes materiales. Se presenta a continuación algunos estudios:

1.9.1. ESTUDIO 1: Efecto de la temperatura, la velocidad de deformación y la microestructura en el comportamiento mecánico de TiAl. [17]

Se estudiaron los resultados obtenidos en el ensayo de tracción de una aleación γ -TiAl a altas temperaturas, así como también se analizó el efecto de la velocidad de deformación.

Los ensayos de tracción se dividieron en dos grupos: ensayos estáticos a baja velocidad de deformación y los ensayos dinámicos a alta velocidad de deformación. También se realizó un estudio de las superficies de fractura donde se observó una doble tipología microestructural del material, laminar y dúplex.

Los ensayos estáticos se realizaron a 25, 500 y 650°C para una velocidad de separación de mordazas de 0.1mm/min, lo cual se traduce en una velocidad de deformación constante de $4.63 \cdot 10^{-5} s^{-1}$.

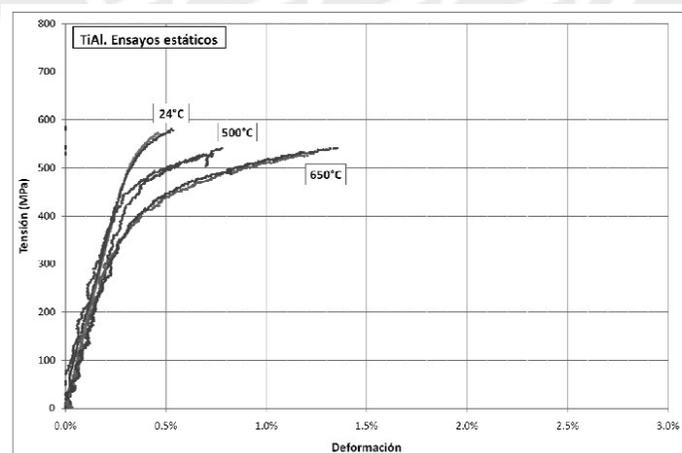


Figura 3: Curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos estáticos [17]

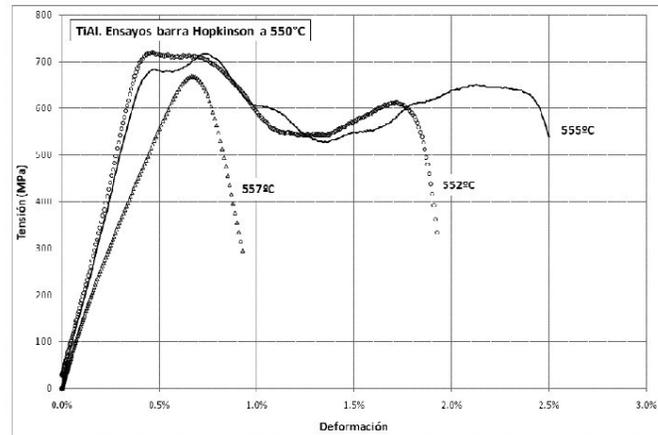


Figura 4: Curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos estáticos [17]

Para el caso de los ensayos dinámicos, estos se realizaron a 25, 550, 650, 750 y 850°C empleando el dispositivo experimental de la barra Hopkinson:

Se presentan los resultados:

Tabla 2: Resultados obtenidos en los ensayos estáticos [17]

Ensayo	Temperatura (°C)	Tamaño relativo de la zona dúplex	Velocidad de deformación (s ⁻¹)	σ_{MAX} (MPa)	ϵ_R (%)
L01	25	1.3%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	573	0.46
L02	25	0.3%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	586	0.54
L03	25		Rotura en rosca		
L04	500	3.9%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	531	0.70
L05	500	8.0%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	545	0.78
L06	650	0.8%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	532	1.24
L07	650	3.0%	$4.63 \cdot 10^{-5}$	544	1.35

Tabla 3: Resultados obtenidos en los ensayos dinámicos [17]

Ensayo	Temperatura (°C)	Tamaño relativo de la zona dúplex	Velocidad de deformación (s ⁻¹)	σ_{MAX} (MPa)	ϵ_R (%)
H01	25	1.4%	246	645	0.56%
H02	25	5.2%	166	675	0.31%
H03	25	-	Rotura en rosca. Ensayo no válido.		
H04	552	19.7%	241	719	1.34%
H05	555	11.7%	261	717	2.46%
H06	557	5.1%	307	669	No video
H07	647	1.1%	278	650	0.61%
H08	649	10.6%	245	583	No video
H09	737	4.7%	258	666	1.04%
H10	739	3.1%	254	717	0.76%
H11	737	8.9%	316	582	No video
H12	857	10.5%	281	640	0.72%
H13	850	1.4%	280	670	No video
H14	830	5.9%	308	593	No video

El estudio de la microestructura se llevó a cabo sobre un corte transversal al eje de la probeta ya ensayada. Producto de esto se reveló una doble microestructura, ya observada con anterioridad por otros autores en una aleación γ -TiAl de la misma composición que la del presente estudio. Esta doble microestructura revela dos zonas claramente diferenciadas en la probeta: la zona exterior presenta una microestructura completamente laminar (FL) con granos formados por láminas de fase γ y láminas de fase α_2 ; mientras que la zona interior de la probeta, de forma irregular y de diferente tamaño de una probeta a otra, presenta una microestructura dúplex (ND) en la que los granos laminares bifásicos (α_2 y γ) se alternan con granos equiaxiales monofásicos de fase γ y [17, pp. 4].

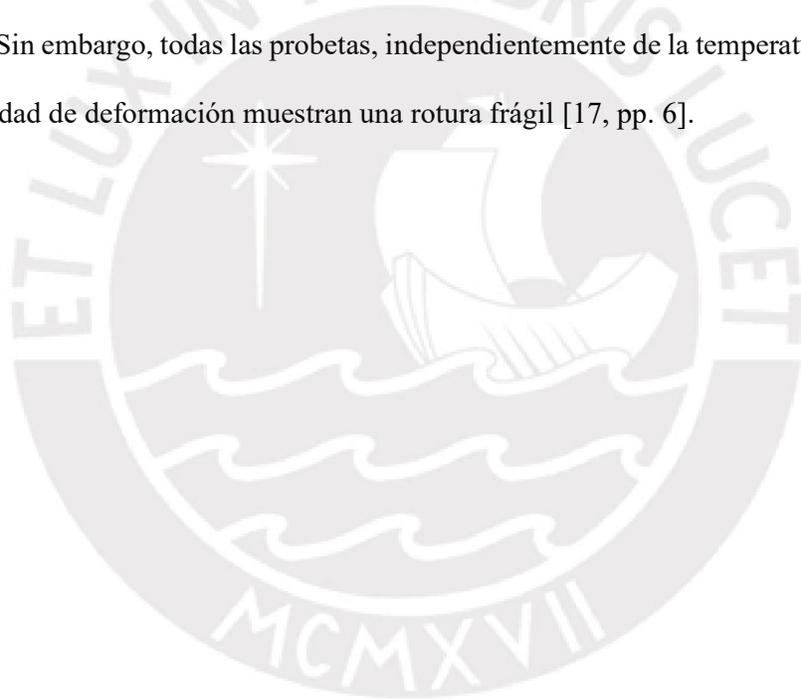
Las probetas con microestructura predominantemente laminar ($ND < 8\%$) muestran un comportamiento con poca deformación a la rotura, no siendo significativa su variación con la temperatura. En cambio, las probetas con microestructura combinada entre laminar γ + dúplex ($ND > 8\%$) muestran un comportamiento con mayor deformación a rotura y con una marcada dispersión [17, pp. 5].

Se evidencia que el esfuerzo último a la tracción se incrementa a medida que lo hace la

velocidad de deformación. Sin embargo, no se tiene mayor variación del esfuerzo último a la tracción con la temperatura.

Debido a que el esfuerzo último a la tracción no tiene una variación significativa con la temperatura de ensayo se concluye que puede tener aplicaciones a temperaturas de servicio moderadas.

En los ensayos estáticos se ha observado un aumento del alargamiento con la temperatura, no siendo tan clara esta tendencia en los ensayos dinámicos. Las probetas con mayor contenido de zona dúplex presentan mayor alargamiento, en cambio, en las probetas con poco contenido de zona dúplex el alargamiento es menor y sin variación apreciable con la temperatura. Sin embargo, todas las probetas, independientemente de la temperatura de ensayo y de la velocidad de deformación muestran una rotura frágil [17, pp. 6].



1.9.2. Estudio 2: Sensibilidad a la velocidad de deformación de aceros laminados en caliente. [28]

Se analizó la sensibilidad a la velocidad de deformación de los aceros de bajo carbono laminados en caliente en los resultados de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último a la tracción.

Se realizaron ensayos a dos velocidades de separación de las mordazas (que se obtienen multiplicando la velocidad de deformación por la longitud de la sección reducida de la probeta): 2 y 40 mm/min, utilizándose probetas planas de acuerdo a la norma ASTM E-8M. El análisis fue realizado sobre dos tipos de aceros estructurales con un número suficientemente alto de probetas, representativas del material, variando las condiciones de fabricación de acuerdo a parámetros industriales [28, pp. 1].

A partir de dos tipos de acero de geometría plana, se obtuvieron 96 sets diferentes de probetas, de las cuales 17 son de acero A42 con espesores menores a 2,2 mm (grupo A), 30 grupos son de acero A42 con espesores mayores a 2,2 mm (grupo B), 13 grupos son de acero A37 con espesores menores a 2 mm (grupo C) y 36 grupos son de acero A37 con espesores mayores a 2 mm (grupo D). Dentro de cada set se contó con 4 a 5 probetas. El rango de espesores de las probetas varía para el acero A42 desde 1.8 mm hasta 3.23 mm, con un espesor promedio de 2.42 mm; para el acero A37 las probetas tienen espesores desde 1.8 mm hasta 4 mm con un promedio de 2.47mm. La composición química de estos aceros varía de acuerdo a los rangos que se señalan en la tabla 4 [28, pp. 3]:

Tabla 4: Rangos de composición química nominal para los aceros estudiados [28]

Grupo	COMPOSICION QUIMICA							
	Espesor (mm)	%C	%Mn	%P (máx)	%S (máx)	%Si (máx)	%Al	N (ppm)
A	< 2	0.12-0.14	0.8-0.9	0.02	0.02	0.03	0.02-0.05	30-50
B	>2	0.13-0.15	0.8-0.9	0.02	0.02	0.03	0.02-0.05	30-50
C	> 2	0.08-0.1	0.5-0.6	0.011-0.02	0.01-0.02	0.03-0.15	0.02-0.5	30-60
D	<2	0.08-0.1	0.45-0.55	0.02	0.02	0.03	0.02-0.05	30-60

Se realizaron cuatro mediciones por cada acero, dos probetas por cada velocidad de ensayo:

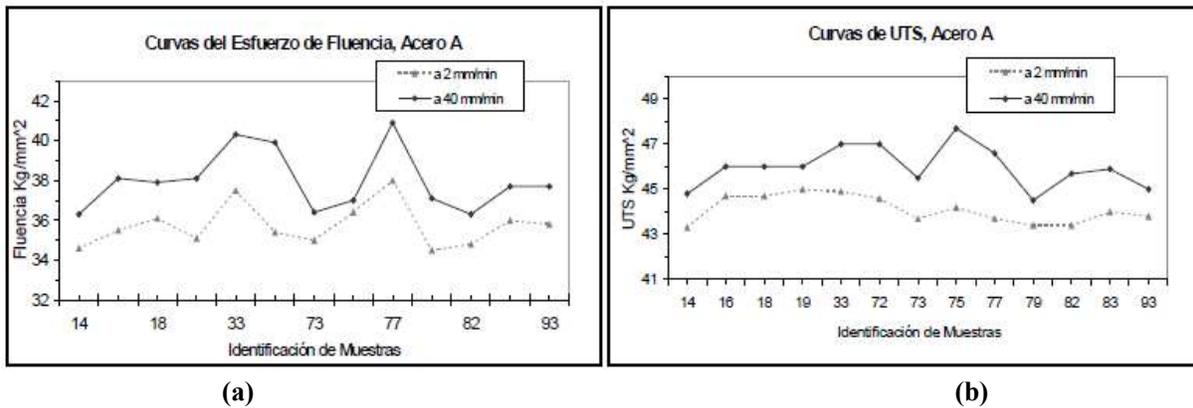


Figura 5: Propiedades mecánicas del acero A42 Grupo A; (a) Esfuerzo de fluencia; (b) UTS

[28]

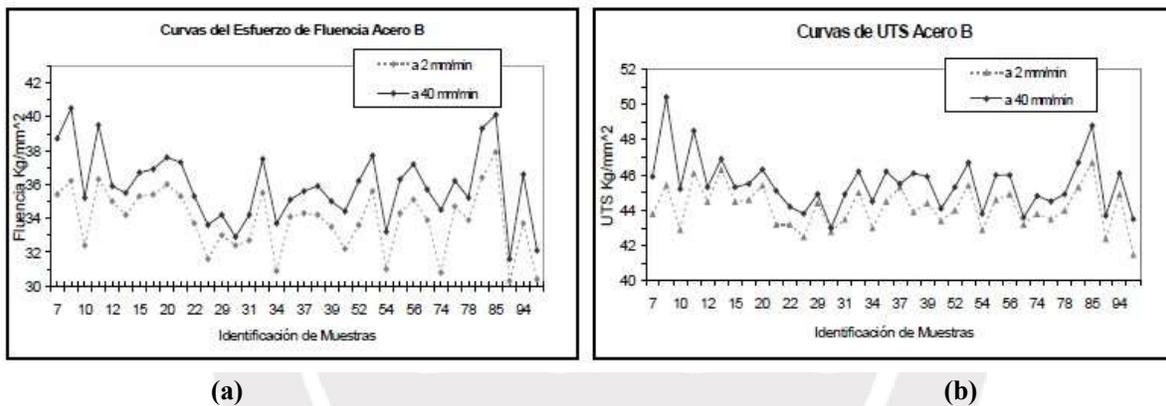


Figura 6: Propiedades mecánicas del acero A42 Grupo B; (a) Esfuerzo de fluencia; (b) UTS

[28]

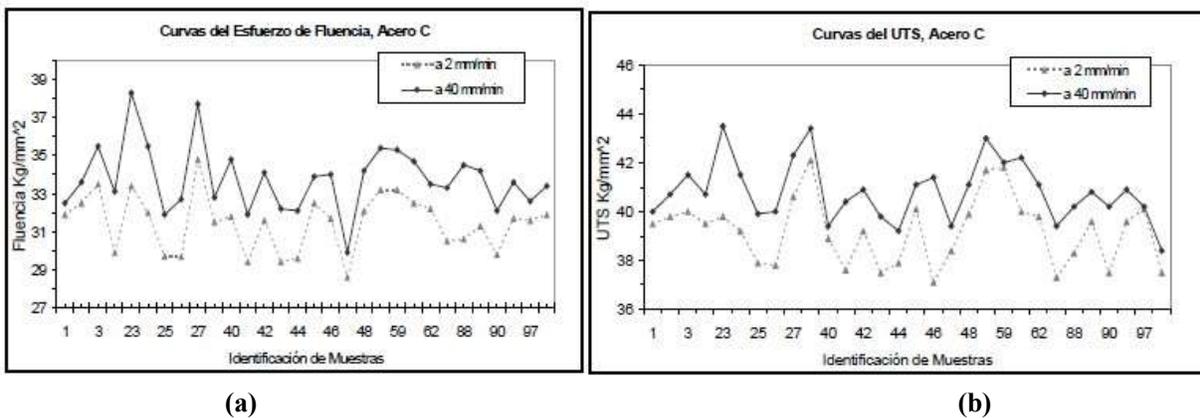


Figura 7: Propiedades mecánicas del acero A37 Grupo C; (a) Esfuerzo de fluencia; (b) UTS

[28]

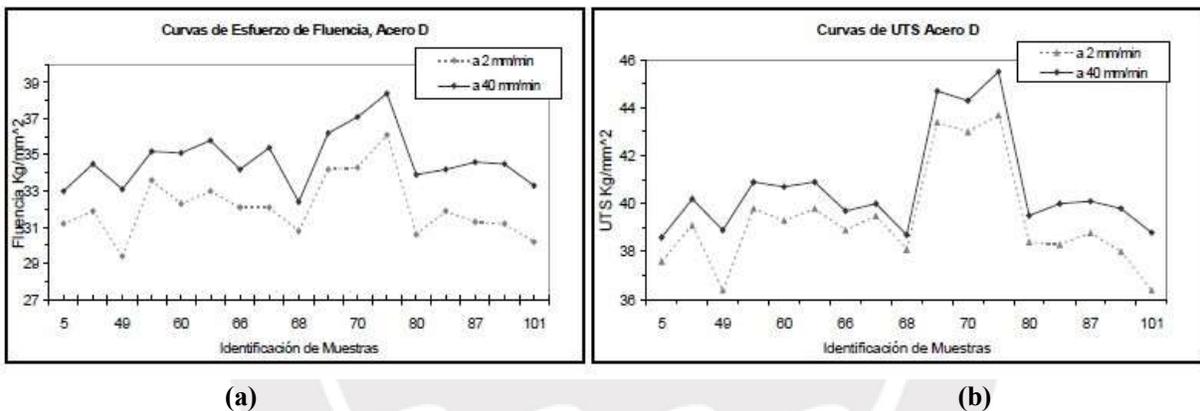


Figura 8: Propiedades mecánicas del acero A37 Grupo D; (a) Esfuerzo de fluencia; (b) UTS

[28]

Se observaron incrementos de hasta 4 kgf/mm² en el límite elástico de este tipo de aceros al elevar la velocidad de separación de mordazas de 2 a 40 mm/min [28, pp. 1]. Por otro lado, del análisis de las figuras presentadas se desprende que, tanto los valores del esfuerzo de fluencia como del UTS (esfuerzo de tracción) aumentan conforme aumenta la velocidad de separación de mordazas. Las variaciones producidas en los valores de estas propiedades en cada una de las figuras se deben a las pequeñas diferencias en composición química y temperaturas de proceso de fabricación del acero [28, pp. 4].

1.9.3. Estudio 3: Investigación de la influencia de la geometría de la probeta en los resultados de la prueba de tracción para diferentes tasas de deformación. [29]

Este estudio busca determinar las propiedades mecánicas de los aceros S235, S355 y el 1.430 para diferente geometría de probetas, así como para diferentes velocidades de deformación.

El ensayo del *“Micro-Tensile Test” (M-TT)* consiste en someter al ensayo de tracción una probeta sumamente pequeña. Los procedimientos de prueba estándar requieren un gran volumen de material. Asimismo, al realizar un ensayo dinámico de tracción en una probeta estándar se necesitará una alta velocidad de deformación/de separación de mordazas, para lo que se necesitaría una máquina de prueba apropiada, que suele ser muy costosa. El ensayo de MTT no sólo permite ahorrar costos, permite realizar ensayos a altas velocidades de deformación usando velocidades de separación de mordazas relativamente bajas, de manera que se tiene alta consistencia de resultados gracias a la significativa reducción de las oscilaciones típicas para pruebas de alta tasa de deformación [29, pp. 2].

Se realizó el ensayo del MTT y el ensayo estándar en varios materiales para cotejar los resultados, los cuales se presentan a continuación:

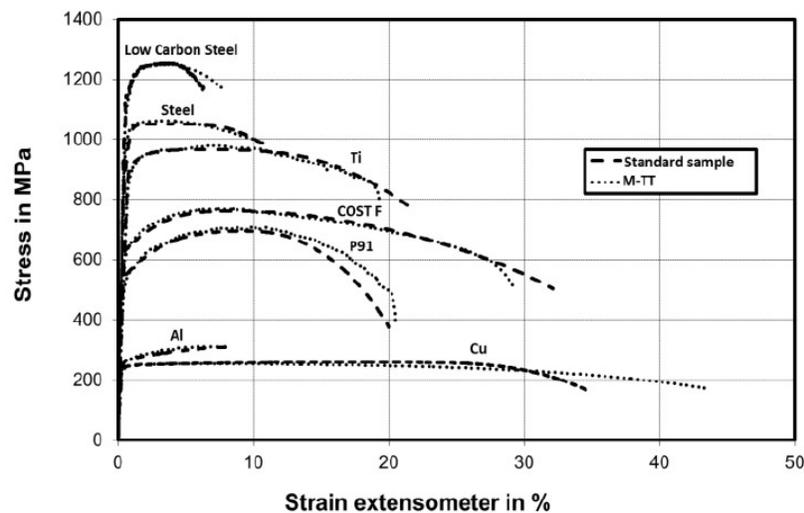


Figura 9: Comparación de resultados obtenidos con el uso de probetas M-TT y probetas de tracción estándar para diversos materiales metálicos. [29]

Posteriormente, los ensayos de los aceros S235, S355 y 1.430 se llevaron a cabo a temperatura ambiente y se usaron las siguientes velocidades de deformación: 0.001, 0.01, 0.1 y 1 s^{-1} .

Las dimensiones de las probetas son las siguientes:

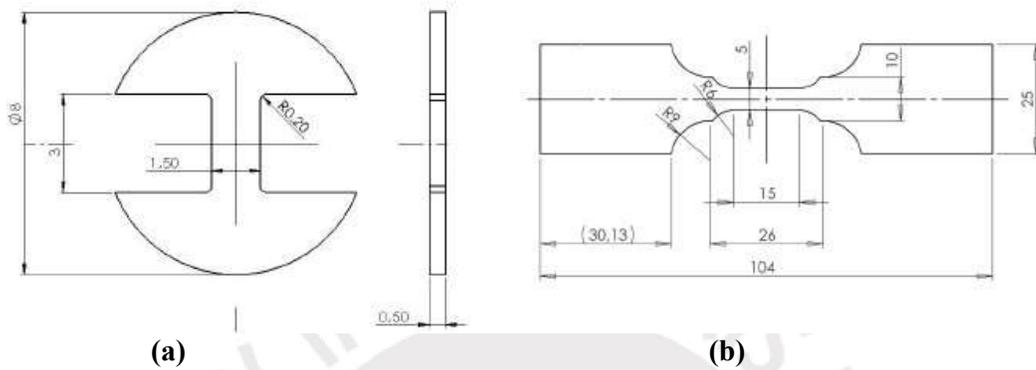


Figura 10: Dimensiones de probetas de ensayo; (a) M-TT; (b) Probeta estándar [29]

Se muestra a manera de ejemplo los resultados obtenidos del acero S355:

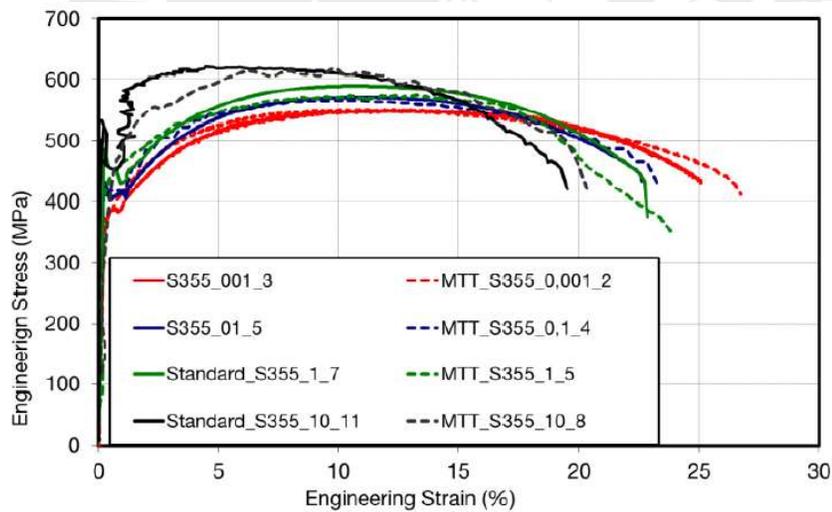


Figura 11: Comparación de resultados obtenidos con el uso de probetas M-TT y probetas estándar del material S355JR. [29]

Para una mayor claridad, los resultados fueron promediados y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5: Resultados del ensayo de tracción [29]

Material	$\dot{\epsilon}$ s ⁻¹	YS MPa	UTS MPa	Material	$\dot{\epsilon}$ s ⁻¹	YS MPa	UTS MPa	Material	$\dot{\epsilon}$ s ⁻¹	YS MPa	UTS MPa
Standard_S235	0,001	209,7	318,6	Standard_S355	0,001	378,6	552,6	Standard_1.4301	0,001	295,6	728,5
	0,1	257,5	340,5		0,1	411,8	572,6		0,1	350,1	672,4
	1	313,1	358,4		1	455,3	589,5		1	362,2	685,3
	10	359,9	393,5		10	468,7	619,5		10	421,2	714,8
MTT_S235	0,001	222,2	327,6	MTT_S355	0,001	383,0	546,1	MTT_1.4301	0,001	319,0	733,7
	0,1	242,4	348,3		0,1	416,5	555,7		0,1	356,0	710,4
	1	324,2	368,6		1	437,1	574,3		1	379,0	712,3
	10	365,0	389,6	10	477,2	641,9	10	445,0	740,6		

Asimismo, se presentan los siguientes gráficos para poder analizar la dependencia del esfuerzo de fluencia (YS) y el esfuerzo de tracción (UTS) respecto a la velocidad de deformación:

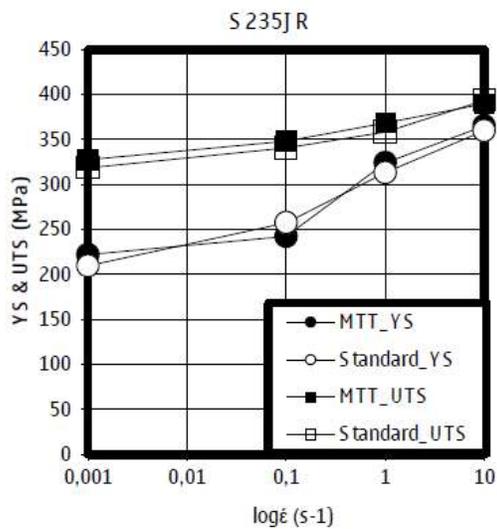


Figura 12

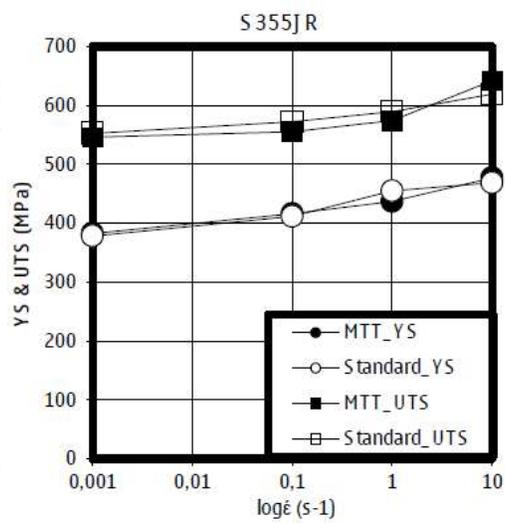


Figura 13

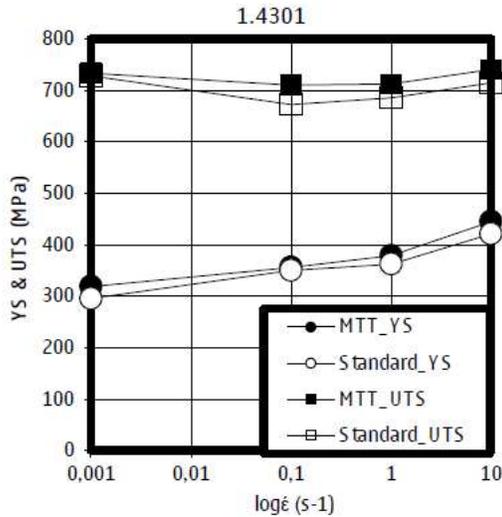


Figura 14

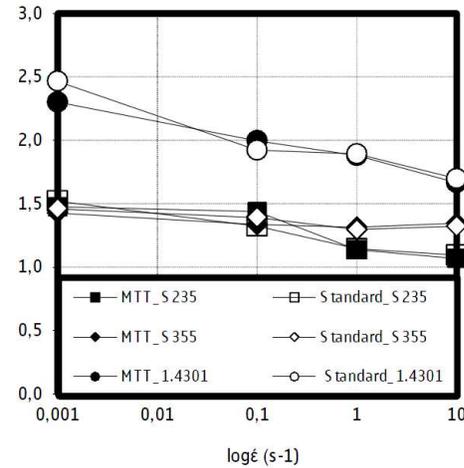


Figura 15

Figura 12: Dependencia de YS y UTS para varias tasas de deformación, S235JR. [29]

Figura 13: Dependencia de YS y UTS para varias tasas de deformación, S355JR [29]

Figura 14: Dependencia de YS y UTS para varias tasas de deformación, 1.4301 [29]

Figura 15: Ratio UTS/YS para varias tasas de deformación [29]

Se evidencia que al aumentar la velocidad de deformación aumenta tanto el esfuerzo de fluencia como el esfuerzo de tracción, así como también disminuye la ductilidad, ya que el incremento de la velocidad de deformación trae consigo la disminución de la reducción de área, lo que ocasiona que disminuya la ductilidad. Por otro lado, al analizar el ratio UTS/YS se puede concluir que a medida que el ratio disminuye también disminuye la ductilidad, esto debido a que el esfuerzo de fluencia es más sensible al aumento de la velocidad de deformación, por ende, este tenderá a aumentar más que el esfuerzo a la tracción, de manera que la tendencia del ratio será decreciente. Además, al aumentar el esfuerzo de fluencia la curva Esfuerzo vs Deformación tiende a elevarse más, lo que traería consigo el decremento de la ductilidad, ya que un material al tener un esfuerzo de fluencia elevado tiende a tener un comportamiento menos dúctil.

Sobre la base de los resultados mostrados es claramente visible que no hay una diferencia significativa entre la probeta estándar y la probeta M-TT. La diferencia en los resultados no excede el 8% [29, pp. 5].



1.9.4. Estudio 4: Efecto del tamaño de probeta y orientación en la resistencia a la tracción y la tenacidad a la fractura. [31]

Se busca analizar el efecto del tamaño de probeta y la orientación para el material utilizado, el cual fue un acero tipo API-5L en forma de placa curva proveniente de una sección de tubo de 609.6 mm de diámetro y 25.4mm de espesor [31, pp. 2].

A continuación, se presenta la orientación de las probetas y su geometría:

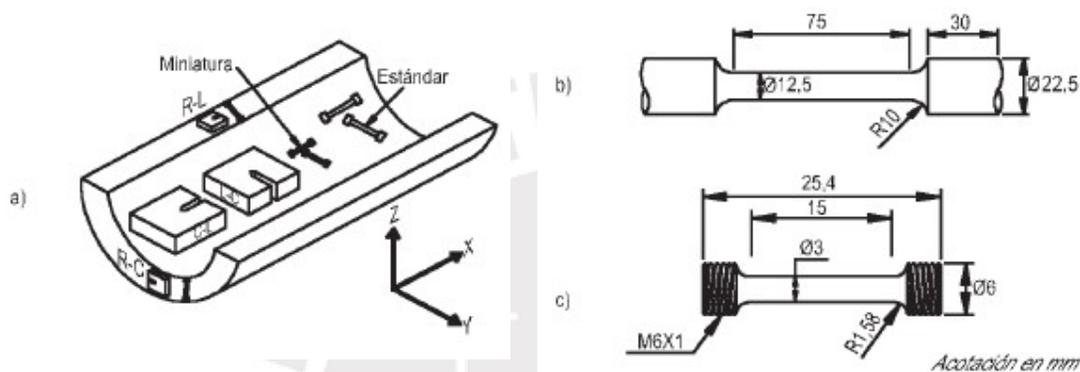


Figura 16: (a) Orientación de las probetas de tracción; (b) Dimensiones de la probeta de tracción estándar; (c) Dimensiones de la probeta de tracción miniatura. [31]

A partir del material suministrado se elaboraron probetas estándar y probetas miniatura: para las estándar, 5 para la orientación longitudinal y 5 para la orientación circunferencial; en el caso de las miniatura, 5 para la orientación longitudinal, 5 para la orientación circunferencial y 10 para la orientación radial.

Por otro lado, se detalla la nomenclatura usada en la tabla de resultados del ensayo de tracción:

N: Número de muestras por ensayo

L: Orientación longitudinal

C: Orientación circunferencial

R: Orientación radial

x: Valor promedio

s: Desviación estándar

% C.V: Coeficiente de variación

Tabla 6: Resultados del ensayo de tracción del acero API-5L utilizado en la experimentación.

[31]

Orientación de las Probetas	N	E (MPa)			σ_{ys} (MPa)			σ_{UTS} (MPa)			% Elongación		
		\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.
Lstd	5	202031	1117	0,55	394	3,41	0,87	521	3,65	0,70	28	0,91	3,25
Cstd	5	214731	3234	1,51	427	3,87	0,91	538	1,81	0,34	27	1,81	6,70
Lmini	5	185756	5003	2,69	442	28,12	6,36	533	5,87	1,10	21	3,89	18,52
Cmini	5	206767	9644	4,66	443	41,98	9,48	542	15,99	2,95	20	4,42	22,10
Rmini	9	198721	6279	1,72	355	26,45	4,40	491	15,77	1,92	25	4,96	19,16

Los resultados muestran diferencias significativas entre las direcciones L y C de las probetas estándar, encontrando que el promedio del límite elástico en la orientación C fue 8.4 % mayor que en la orientación L y el esfuerzo de tracción C fue 3.26 % mayor que en la orientación L. Comparando los valores del límite elástico entre probetas miniatura con probetas estándar en la orientación L, fueron 12 % más altos en las probetas miniatura que en las estándar. En la orientación C no hubo diferencias significativas entre los dos tamaños de probeta [31, pp. 6].

Un resultado significativo de esta investigación es que se pudieron determinar las propiedades de tracción uniaxial en la orientación R con probetas miniatura. Los resultados muestran que el esfuerzo a la tracción en la orientación R es el más débil de las tres direcciones principales del tubo, con un límite elástico 24 % menor que en la orientación L y 22 % menor que en la C, comparando entre probetas miniatura. Este resultado es similar si se comparan las probetas estándar con la miniatura [31, pp. 6].

Al comparar el efecto de tamaño en las propiedades mecánicas se observa que probetas miniatura tienden a presentar valores más altos que en las probetas estándar. En la orientación

longitudinal, el efecto de tamaño consiste en que a menor tamaño de probeta más resistencia mecánica se tiene, aproximadamente del 10 al 13 % [31, pp. 11].

Otro aspecto importante que se observa en los resultados es que el alargamiento cambia con el tamaño, reduciéndose hasta un 2 % en promedio con respecto a las probetas estándar. [31, pp. 12]. En las pruebas de tracción uniaxial se observaron diferencias significativas entre las dos orientaciones de las probetas estándar, donde el límite elástico y resistencia última mostraron diferencias de 8.37 % y 3.26 % menores en la orientación longitudinal que en la orientación circunferencial. Así mismo, el coeficiente de variación es más alto en la orientación circunferencial con respecto a la orientación longitudinal [31, pp. 12].

Al comparar los resultados de las pruebas de tracción, las probetas miniatura en la orientación longitudinal con respecto a la orientación circunferencial muestran la misma tendencia que en las probetas estándar, es decir, la orientación circunferencial tiende a tener valores más altos, pero las probetas miniatura en la orientación corta muestran valores más bajos, del orden del 24.64 % en el límite elástico y del 9.47 % de resistencia última, con respecto al promedio de las otras direcciones [31, pp. 12].

1.9.5. Estudio 5: Caracterización numérico-experimental de las propiedades mecánicas del acero estructural en un rango amplio de temperaturas. [15]

Se realizó un estudio acerca de la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas del acero estructural A 42-27 ES. Con el objetivo de analizar el comportamiento del acero estructural, se efectuaron análisis de tipo numérico y experimental realizando el ensayo de tracción en un rango amplio de temperaturas, específicamente entre -196°C y 300°C . Para realizar los ensayos a altas temperaturas se usó un horno eléctrico, mientras que para el caso a bajas temperaturas se usó un recipiente estanco en el que se utilizó nitrógeno líquido.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de tracción, cabe resaltar que la probeta es de sección circular:

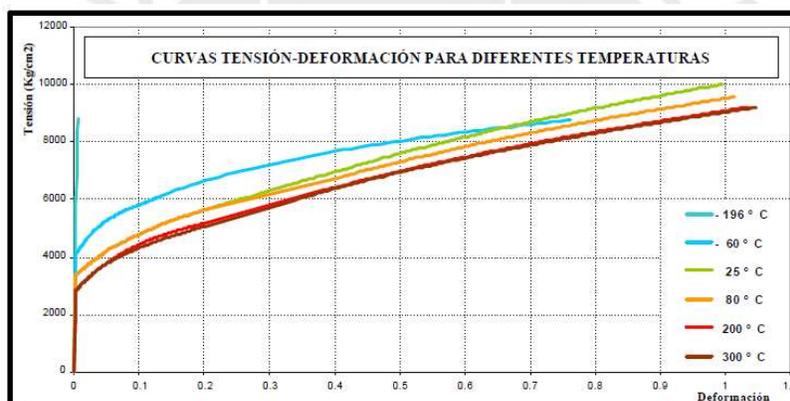


Figura 17: Curva Esfuerzo vs Deformación real para diferentes temperaturas. [15]

Se observa que el comportamiento del material cambia considerablemente cuando la temperatura varía desde -196° a 300°C . Se debe notar que el módulo de elasticidad no varía con la temperatura, sin embargo, el límite de proporcionalidad presenta una disminución con el aumento de la temperatura. El esfuerzo de tracción sigue la misma tendencia que el esfuerzo de fluencia mientras que la deformación aumenta con el incremento de la temperatura. A menor temperatura el acero presenta un comportamiento frágil, debido que experimenta poca deformación presentando a la vez gran resistencia, de manera que la rotura del material se dará

con poca disminución del área de la sección transversal. En contraste, cuando la temperatura es elevada, el acero presenta gran deformación plástica, asociado a una gran disminución del área, de manera que el material tenga un comportamiento dúctil. El comportamiento frágil del material es también evidente a -60°C , sin embargo, las curvas referentes a temperaturas superiores a esta e inferiores a 300° no presentan diferencias significativas en cuanto a su tendencia [15, pp. 5].

El comportamiento del material en estudio también se puede evidenciar analizando la superficie de fractura, ya que se puede reconocer el mecanismo de falla:

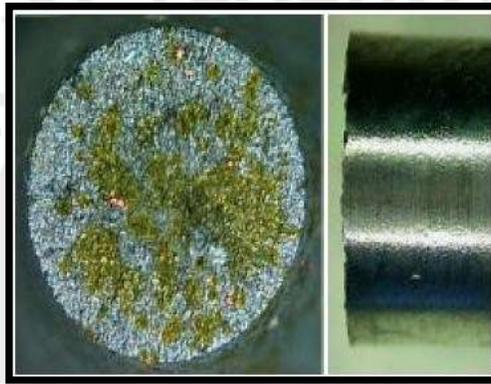


Figura 18: Vista transversal y lateral de probeta fracturada a -196°C . [15]

En la Figura 18 se muestra una fotografía transversal y otra lateral de una probeta fracturada a -196°C , en la cual se puede apreciar que la sección transversal es plana y se dispone perpendicular respecto al eje longitudinal de la probeta; además se mantiene la sección circular original cuyo diámetro prácticamente no sufre variación. Las zonas con manchas verdosas de la fotografía corresponden a la oxidación casi inmediata que se produce en el acero una vez que se retira el nitrógeno líquido. Si se asocia este tipo de fractura a la curva tensión deformación del material, evidencia que la falla es frágil, lo cual se demuestra al no apreciarse contracción lateral de la probeta debido a la recuperación elástica del acero al remover la carga [15, pp. 6].



Figura 19: Fractografía de probeta fracturada a 200° C 1) superficie extremo superior, 2) superficie extremo inferior, 3) y 4) vistas del extremo inferior [15]

En la Figura 19 se presenta la sección transversal de los dos extremos de la probeta fracturada a 200° C, donde se puede apreciar la configuración como copa. Existen dos zonas particularmente predominantes, una de ellas es la superficie del cono truncado que se presenta relativamente plana y circular. La otra zona corresponde a un anillo perimetral, el cual se dispone en un ángulo de aproximadamente 45° respecto al eje longitudinal de la probeta, en el cual ocurre fractura dúctil por cizalle. Además, se puede observar la importante disminución del diámetro, lo que corresponde a una fractura producida por mecanismo dúctil [15, pp. 7].

Se evidencia la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del acero estructural, en particular los valores de esfuerzo de fluencia, esfuerzo de tracción y deformación. Para bajas temperaturas se observó una conducta frágil del material, mientras que para el resto de las temperaturas el acero mostró un comportamiento predominantemente dúctil. Se puede derivar de este trabajo, que un parámetro de diseño que podría ser recomendado es el control de la deformación para bajas temperaturas a modo de protección de la fractura frágil, como una alternativa más segura que los esfuerzos admisibles [15, pp. 8].

El modelamiento usando elementos finitos es una alternativa de bajo costo comparado

con los clásicos ensayos en laboratorio, en términos de equipamiento requerido. Resulta sencilla la realización de análisis numéricos para determinar parámetros internos que caractericen el comportamiento en los regímenes elástico, plástico y ruptura [15, pp. 8].

El análisis de la superficie fracturada resultó una valiosa herramienta para relacionar el comportamiento del material con la falla provocada en la superficie de la probeta, permitiendo de esta manera diferenciar la falla frágil de la dúctil [15, pp. 8].



1.9.6. Estudio 6: Comportamientos de microestructura y deformación de dos aleaciones Mg-Li con doble fase con un incremento de la velocidad de deformación. [18]

Este estudio busca analizar el comportamiento de dos aleaciones de Magnesio y Litio, la aleación Mg-8.02Li-0.210Y y Mg-8.43Li-0.353Ymm. Se evaluaron a velocidades de deformación comprendidas desde $1.28 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ hasta $1.28 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, estas velocidades de deformación son las usadas para hallar las propiedades de la fluencia. Cabe resaltar que, a medida que aumenta la velocidad de deformación para hallar las propiedades de la fluencia, también aumenta la velocidad de deformación para hallar el alargamiento y el esfuerzo de tracción [18, pp. 1].

Los resultados mostraron que, al aumentar la velocidad de deformación, la resistencia aumenta mientras que el alargamiento disminuye. Las propiedades mecánicas de ambas aleaciones se muestran en las figuras 20 y 21:

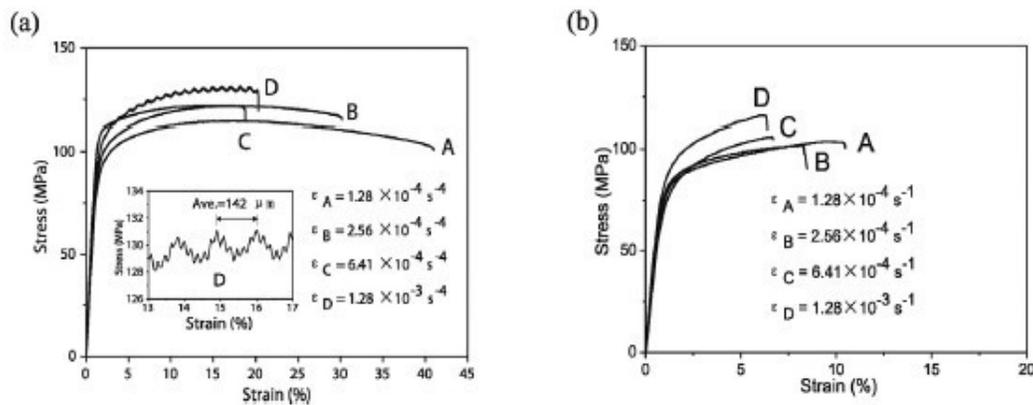


Figura 20: Gráficos de esfuerzo vs deformación de las aleaciones para diferentes tasas de deformación. Mg-8.02Li-0.210Y (a) y Mg-8.43Li-0.353Ymm (b) [18]

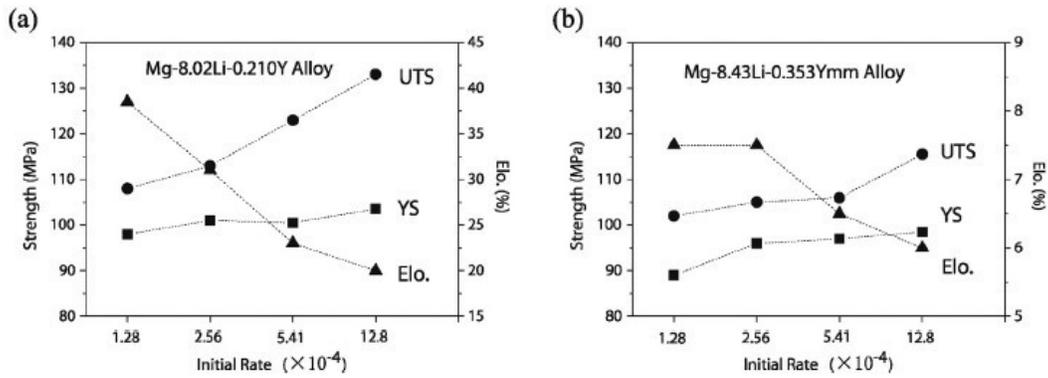


Figura 21: Propiedades de las aleaciones de Mg-8.02Li-0.210Y (a) y Mg-8.43Li-0.353Ymm (b) para distintas velocidades de deformación a temperatura ambiente [18]

A medida que la velocidad de deformación aumenta desde 1.28×10^{-4} s $^{-1}$ hasta 1.28×10^{-3} s $^{-1}$, el esfuerzo de fluencia del Mg-8.43Li-0.353Ymm incrementa de 89 MPa a 96 MPa, mientras que el esfuerzo de fluencia del Mg-8.02Li-0.210Y incrementa no más 6 MPa. El esfuerzo de tracción del 8.43Li-0.353Ymm es cercano a 105 MPa, mientras que el del Mg-8.02Li-0.210Y varía entre 110 y 135 MPa [18, pp. 2].

El esfuerzo de tracción y el alargamiento del Mg-8.02Li-0.210Y son más sensibles al aumento de la velocidad de deformación que en el caso del 8.43Li-0.353Ymm. A medida que aumenta la velocidad de deformación, el esfuerzo de tracción Mg-8.02Li-0.210Y y del 8.43Li-0.353Ymm aumenta 23% y 13% respectivamente. Por otro lado, como se mencionó anteriormente, el alargamiento disminuye a medida que se incrementa la velocidad de deformación. El Mg-8.02Li-0.210Y tiene 38.5% de alargamiento para una velocidad de deformación de 1.28×10^{-4} s $^{-1}$, la cual disminuye hasta 20% cuando la velocidad de deformación incrementa a 1.28×10^{-3} s $^{-1}$. En el caso, del 8.43Li-0.353Ymm, disminuye desde 7.5% hasta un valor de 6% tomando las mismas velocidades de deformación que en el primer caso [18, pp. 2-3].

2. Metodología de ensayo

La metodología para el estudio de la influencia de los parámetros de ensayo de tracción para el acero de bajo carbono laminado en caliente se desarrollará de la siguiente manera:

Según las tres normas referentes al ensayo de tracción (ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M – 16a e ISO 6892-1:2016), se determinará y delimitará los rangos de ensayo para que de esa manera el ensayo cumpla lo estipulado por las 3 normas en conjunto.

Estas normas han sido desarrolladas como estándares para la realización de ensayos de tracción, estableciendo las condiciones y procedimientos más adecuados para la obtención de buenos resultados. De manera que se procederá a evaluar la influencia de los parámetros escogidos de ensayo que influyen en los resultados.

El material es una platina de A36 laminada en caliente con dimensiones 1/8''x2''x6'. Se caracteriza el material. Luego, se mecanizarán dos tipos de probetas para cubrir con las exigencias de las normas internacionales referentes a los ensayos de tracción. Se ensayarán las probetas preparadas variando los parámetros de velocidad y temperatura de ensayo. Cada parámetro se ensayará bajo tres condiciones (bajo, medio, alto).

La velocidad de ensayo se establece por la separación de las mordazas, para lo cual se tiene dos rangos de velocidades, uno para las probetas de mayor ancho y otro para las probetas de menor ancho. Cabe resaltar que, cada velocidad elegida se divide en dos tramos, un primer tramo desde el inicio del ensayo hasta la fluencia y otro tramo pasada la fluencia hasta la rotura del material.

Para el caso del parámetro geométrico, se tendrá dos tipos de probeta como ya se mencionó anteriormente: probetas estándar y probetas subsize.

Además, se deberán de realizar cálculos de manera que se pueda evaluar la influencia de los parámetros de ensayo, ya que este es el objetivo de esta tesis, por lo que usará lo

siguiente:

Con el espesor y ancho de probeta, se calcula el área de la sección reducida sometida a tracción de la siguiente manera:

$$S_0 = a_0 * b_0$$

Ecuación 3: Área de la sección reducida

Se calcula el esfuerzo de ingeniería como el cociente entre la fuerza axial actuante (" F ") con el área transversal inicial. Asimismo, se define el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de tracción:

$$R = \frac{F}{S_0}$$

Ecuación 4: Esfuerzo

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}$$

Ecuación 5: Esfuerzo de fluencia

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

Ecuación 6: Esfuerzo de tracción

Por cada combinación de ensayo se halla los esfuerzos promedios. Sin embargo, no solo basta con conocer el esfuerzo promedio por cada ensayo, también se debe conocer la dispersión que presenta las muestras en su distribución, de manera que se pueda elegir correctamente la probeta que presente una menor variación respecto a los valores promedios, es por eso que se calcula la desviación estándar por cada ensayo, lo cual ayuda en la elección de la probeta que mejor represente el comportamiento del material para cada combinación de parámetros.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 7: Desviación estándar

El alargamiento, el cual está en función de la longitud inicial entre marcas y la longitud final entre marcas luego de que se produce la rotura de la probeta:

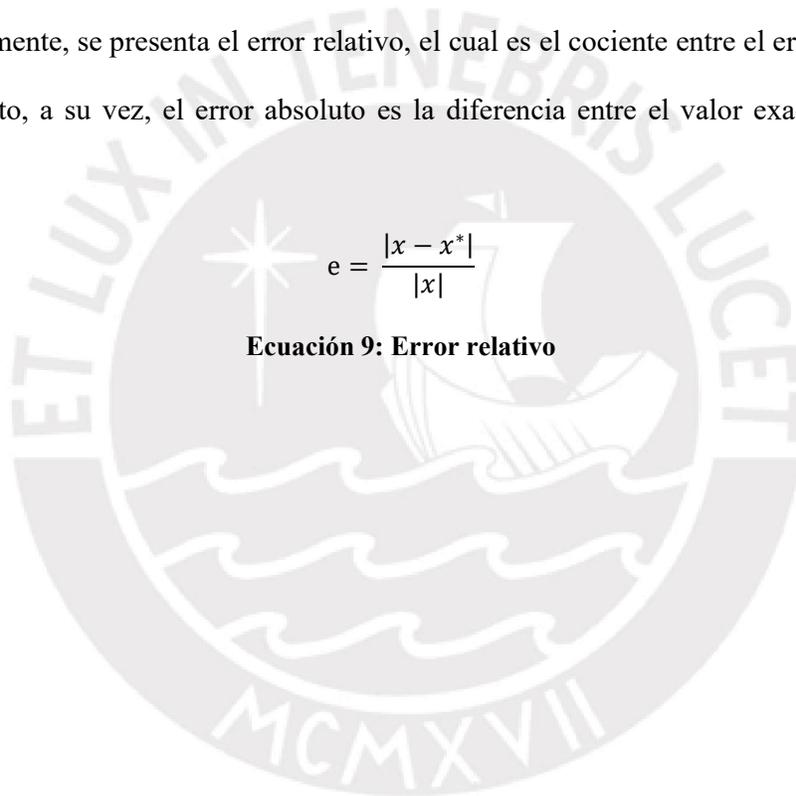
$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100$$

Ecuación 8: Alargamiento

Finalmente, se presenta el error relativo, el cual es el cociente entre el error absoluto y el valor exacto, a su vez, el error absoluto es la diferencia entre el valor exacto y el valor aproximado:

$$e = \frac{|x - x^*|}{|x^*|}$$

Ecuación 9: Error relativo



2.1. Temperatura de ensayo

2.1.1. Norma ASTM A370 - 19

A condiciones ambientales establece una temperatura que se encuentra entre 10 y 35 °C [5].

2.1.2. Norma ASTM E8/E8M – 16a

A condiciones ambientales establece una temperatura que se encuentra entre 10 y 38 °C [8].

2.1.3. Norma ISO 6892-1:2016

A condiciones ambientales se establece una temperatura que se encuentra entre 10 y 35 °C con una temperatura media de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ [19].

Se obtiene un rango de temperaturas, del cual acotaremos las tres condiciones para el presente trabajo (bajo, medio, alto) de la siguiente manera:

Tabla 7: Temperaturas según normas ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M – 16a, ISO 6892-1:2016

NORMA	UNIDADES	TEMPERATURA DE ENSAYO	
		RANGO INFERIOR	RANGO SUPERIOR
ASTM A370 – 19	°C	10	35
ASTM E8/E8M – 16a		10	38
ISO 6892-1:2016		10	35

Se escoge las temperaturas de 10, temperatura ambiente y 35 °C.

Temperaturas de ensayo:

- Temperatura baja = 10°C.
- Temperatura media = Temperatura ambiente = 23°C.
- Temperatura alta = 35°C.

2.2. Velocidad de deformación del ensayo

2.2.1. Selección de velocidades de deformación

Norma ASTM A370 - 19: Para la fluencia, se recomienda que la velocidad de deformación no exceda 1/16 pulgadas por minuto por pulgada de sección reducida. Para la resistencia a la tracción, se recomienda que la velocidad de deformación no exceda 1/2 pulgadas por minuto por pulgada de sección reducida. Adicionalmente, la velocidad mínima de deformación para cualquier evento no debe de ser menor a 1/10 del valor recomendado en cada caso, con esto obtenemos los rangos inferiores tanto para la fluencia y la resistencia a la tracción [5].

Norma ASTM E8/E8M – 16a: En este caso, se usará el método C, que nos indica que la velocidad deberá mantenerse en 0.015 ± 0.003 mm/mm/min para las propiedades de la fluencia. Para el caso del esfuerzo a la tracción, en el punto 7.6.5 de la norma especifica que la tasa de deformación debe de estar en el rango de 0.05 y 0.5 mm/mm/min [8].

Norma ISO 6892-1:2016: Los valores presentados a continuación son para la velocidad de deformación sobre la longitud de la sección reducida:

Fluencia: Para determinar las propiedades de la fluencia, usamos el Rango 2: $0.00025 s^{-1}$ y el Rango 3: $0.002 s^{-1}$ [19].

Esfuerzo a la tracción: El método A recomienda que la velocidad de deformación sea $0.00025 s^{-1}$, también recomienda una velocidad de $0.4 min^{-1}$ para el esfuerzo de tracción. El método B recomienda que la velocidad de deformación para obtener el esfuerzo de tracción en ningún caso sea mayor a $0.008 s^{-1}$. Entre los dos métodos tendríamos la velocidad de deformación superior (velocidad de deformación alta) entre $0.4 min^{-1}$ y $0.48 min^{-1}$, tomaremos $0.45 min^{-1}$ [19].

Cabe resaltar que en el punto 3.7.2. de dicha norma, se especifica que el valor de la velocidad de deformación sobre la longitud de la sección reducida está expresada en términos

de la velocidad de separación de las mordazas y de la longitud de la sección reducida de la probeta.

Luego, en el punto 10.3.2.1, se presenta la relación mencionada:

$$v = L * \dot{\epsilon}$$

Ecuación 10: Velocidad de separación de mordazas

Sin embargo, en el punto 4 (simbología) de la norma, la velocidad de deformación sobre la longitud de la sección reducida tiene por unidades s^{-1} , esto debido a que utilizando la relación anteriormente presentada se simplifica las otras unidades quedando solo s^{-1} , por ello, la norma presenta las unidades de esta manera.

Se tendría lo siguiente:

Tabla 8: Velocidades de deformación según normas ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M – 16a, ISO 6892-1:2016

Norma	Unidades	Propiedades de la fluencia		Propiedades de la tracción	
		Rango inferior	Rango superior	Rango inferior	Rango superior
ASTM A370 – 19	mm/mm/min	0.00625	0.0625	0.05	0.5
ASTM E8/E8M-16a		0.012	0.018	0.05	0.5
ISO 6892-1:2016		0.015	0.12	0.015	0.45
Rango común		0.015/0.0165/0.018		0.05/0.265/0.45	

2.3. Geometría de la probeta

Según lo mencionado a principios del capítulo 2, debido a la disponibilidad del mercado se adquirió una platina de 3/8'' de espesor y en base a la geometría de la platina se escogió convenientemente el tipo de probeta, ya que cada norma ofrece varios tipos de probeta dependiendo de la pieza que se quiere someter a tracción.

Además, por transporte y facilidad de manufactura se eligió un el perfil de la platina.

2.3.1. Norma ASTM A370 - 19:

Se especifica para el caso de perfiles con un espesor nominal menor a 5mm (3/16'').

Asimismo, las especificaciones sobre las dimensiones generales se muestran a continuación:

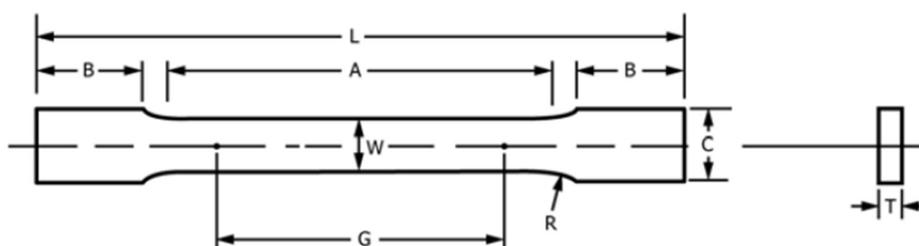


Figura 22: Geometría de la probeta de ensayo para perfiles según norma ASTM A370-19 [5]

G: Longitud entre marcas

W: Ancho de probeta

R: Redondeo

T: Espesor de la probeta

L: Longitud total de la probeta

A: Longitud de la sección reducida

B: Longitud de la sección de sujeción

C: Ancho de la probeta/ Ancho de la sección de sujeción

Ahora se presentan las dimensiones:

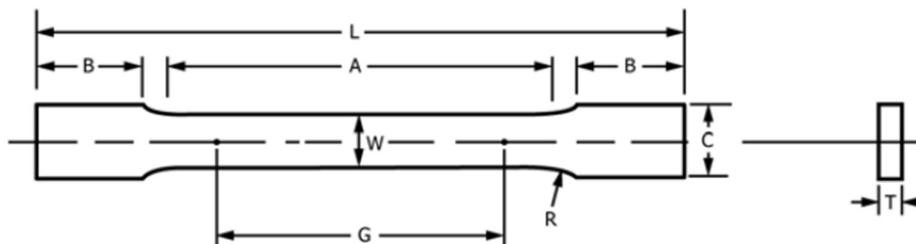
Tabla 9: Dimensiones de probeta según norma ASTM A370 – 19 [5]

Dimensión (mm)	Probeta estándar	Probeta subsize
G	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.08
W	12.5 ± 0.25	6.25 ± 0.05
T	Espesor del material	Espesor del material
R	13	6
L	200	100
A	60	32
B	50	32
C	20	10

2.3.2. Norma ASTM E8/E8M – 16a:

Se especifica para el caso de perfiles con un espesor nominal menor a 5mm (0.188’’).

Asimismo, las especificaciones sobre las dimensiones generales se muestran a continuación:

**Figura 23: Geometría de la probeta de ensayo para perfiles según norma ASTM E8/E8M – 16a**

[8]

G: Longitud entre marcas

W: Ancho de probeta

R: Redondeo

T: Espesor de la probeta

L: Longitud total de la probeta

A: Longitud de la sección reducida

B: Longitud de la sección de sujeción

C: Ancho de la probeta/ Ancho de la sección de sujeción

Ahora se presentan las dimensiones:

Tabla 10: Dimensiones de probeta según norma ASTM E8/E8M – 16a [8]

Dimensión (mm)	Probeta estándar	Probeta subsize
G	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T	Espesor del material	Espesor del material
R	12.5	6
L	200	100
A	57	32
B	50	30
C	20	10

2.3.3. Norma ISO 6892-1:2016:

Con el espesor de la platina se obtiene la geometría de la probeta según las especificaciones de la norma ISO 6892-1:2016. Cabe resaltar que lo planteado por esta norma sigue el mismo patrón y es congruente con las normas ASTM E8/E8M – 16a y ASTM A370 - 19. Asimismo, las especificaciones sobre las dimensiones generales se especifican a continuación:

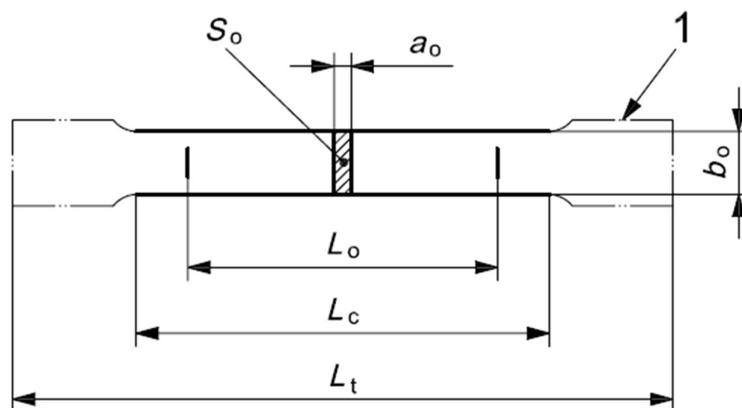


Figura 24: Geometría de la probeta de ensayo para probetas planas según norma ISO 6892-1:2016 [19]

Se presentan las dimensiones para las longitudes especificadas:

Tabla 11: Dimensiones de probeta según norma ISO 6892-1:2016 [19]

Tipo	Ancho de probeta b_o (mm)	Longitud entre marcas L_o (mm)	Longitud de la sección reducida (mm)	Distancia libre entre mordazas (mm)
1	12.5 ± 1	50	57	87.5
2	20 ± 1	80	90	140
3	25 ± 1	50	60	-

Debido a que la norma ISO 6892-1:2016 cumple con las medidas de la norma ASTM E8/E8M – 16a que es la norma para ensayos de tracción para materiales metálicos se puede tomar dicha norma ASTM como referencia para mecanizar las probetas. De manera similar, la norma ASTM A370 - 19 sólo difiere con la norma ASTM E8/E8M – 16a en pequeñas medidas manteniendo la misma longitud entre marcas, por lo que se mecanizará las probetas según la norma ASTM E8/E8M – 16a.

2.4. Procedimiento del ensayo

2.4.1. Cálculo de la velocidad de ensayo

Para cada ensayo a realizarse, se necesita especificar las dos velocidades de ensayo en términos de la velocidad de separación de las mordazas, de manera que se tendrá una velocidad para hallar el esfuerzo de fluencia y otra para hallar el esfuerzo de tracción para cada ensayo.

Según lo presentado en el punto 2.2.1, usamos la ecuación 10 para obtener la velocidad de separación de las mordazas:

$$v = L * \dot{\epsilon}$$

Donde L es la longitud de la sección reducida, v es la velocidad de separación de las mordazas y $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación sobre la longitud de la sección reducida:

Se presenta a continuación las velocidades de ensayo para las probetas subsize en términos de la velocidad de separación de mordazas.

Tabla 12: Velocidades de ensayo para probetas subsize para cada propiedad

Tamaño	Longitud de la sección reducida (mm)	Velocidad de deformación mm/mm/min	Propiedad	Velocidad de ensayo mm/min
Probeta subsize	32	Baja: 0.015	Fluencia	Baja: 0.48
Probeta subsize	32	Media: 0.0165	Fluencia	Media: 0.53
Probeta subsize	32	Alta: 0.018	Fluencia	Alta: 0.58
Probeta subsize	32	Baja: 0.05	Tracción/Alar.	Baja: 1.6
Probeta subsize	32	Media: 0.265	Tracción/Alar.	Media: 8.48
Probeta subsize	32	Alta: 0.45	Tracción/Alar.	Alta: 14.4

Velocidades de ensayo para las probetas estándar:

Tabla 13: Velocidades de ensayo para probetas estándar para cada propiedad

Tamaño	Longitud de la sección reducida (mm)	Velocidad de deformación mm/mm/min	Propiedad	Velocidad de ensayo mm/min
Probeta estándar	57	Baja: 0.015	Fluencia	Baja: 0.86
Probeta estándar	57	Media: 0.0165	Fluencia	Media: 0.94
Probeta estándar	57	Alta: 0.018	Fluencia	Alta: 1.03
Probeta estándar	57	Baja: 0.05	Tracción/Alar.	Baja: 2.85
Probeta estándar	57	Media: 0.265	Tracción/Alar.	Media: 15.11
Probeta estándar	57	Alta: 0.45	Tracción/Alar.	Alta: 25.65

Con lo que finalmente se tiene:

Tabla 14: Velocidades por cada ensayo para probetas subsize

Probeta subsize	Velocidad de ensayo mm/min (fluencia)	Velocidad de ensayo mm/min (tracción)
V baja	0.48	1.6
V media	0.53	8.48
V alta	0.58	14.4

Tabla 15: Velocidades por cada ensayo para probetas estándar

Probeta estándar	Velocidad de ensayo mm/min (fluencia)	Velocidad de ensayo mm/min (tracción)
V baja	0.86	2.85
V media	0.94	15.11
V alta	1.03	25.65

2.4.2. Combinaciones de velocidad, temperatura y tamaño de probeta

Según lo presentado anteriormente se tiene lo siguiente:

Probetas:

- Probetas estándar
- Probetas subsize

Temperaturas de ensayo:

- Temperatura baja
- Temperatura media
- Temperatura alta

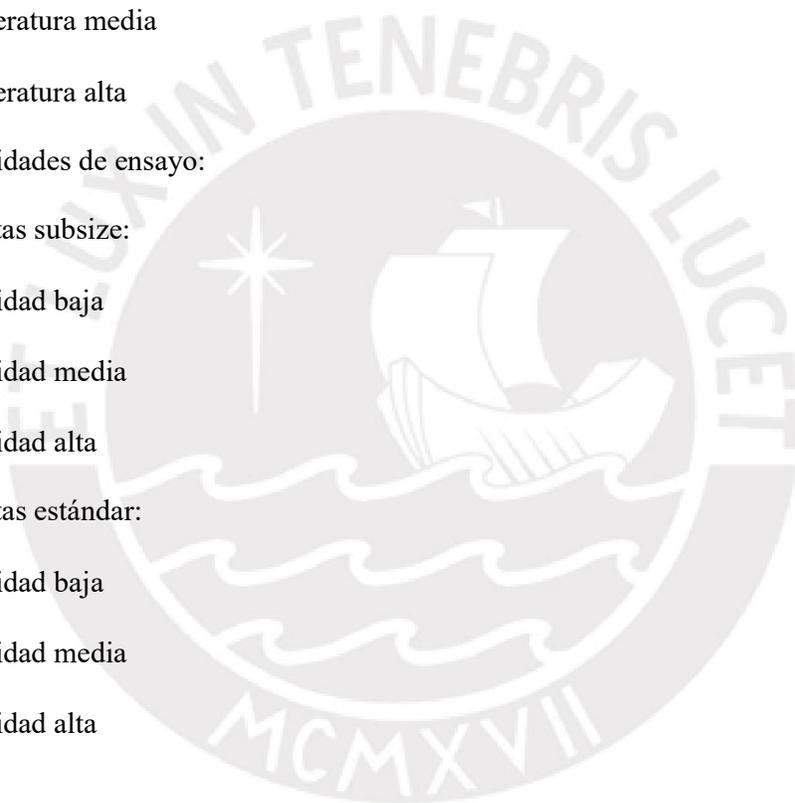
Velocidades de ensayo:

Probetas subsize:

- Velocidad baja
- Velocidad media
- Velocidad alta

Probetas estándar:

- Velocidad baja
- Velocidad media
- Velocidad alta



Al combinar los parámetros se obtiene las siguientes combinaciones:

Tabla 16: Combinaciones de parámetros para probetas estándar

Probetas estándar
Tbaja, Vbaja, Pestándar
Tbaja, Vmedia, Pestándar
Tbaja, Valta, Pestándar
Tmedia, Vbaja, Pestándar
Tmedia, Vmedia, Pestándar
Tmedia, Valta, Pestándar
Talta, Vbaja, Pestándar
Talta, Vmedia, Pestándar
Talta, Valta, Pestándar

Tabla 17: Combinaciones de parámetros para probetas subsize

Probetas subsize
Tbaja, Vbaja, Psubsize
Tbaja, Vmedia, Psubsize
Tbaja, Valta, Psubsize
Tmedia, Vbaja, Psubsize
Tmedia, Valta, Psubsize
Talta, Vbaja, Psubsize
Talta, Vmedia, Psubsize
Talta, Valta, Psubsize

2.4.3. Número de probetas ensayadas

A continuación se presenta la cantidad de probetas ensayadas por cada tipo de ensayo del presente estudio:

Tabla 18: Cantidad de probetas por ensayo

Tipo de ensayo	Cantidad	Observaciones
Análisis químico	1	-
Metalografía	2	1 en dirección transversal 1 en dirección longitudinal
Tracción	51	27 probetas estándar 24 probetas subsize



3. Resultados y análisis de resultados

Se presentan los resultados obtenidos al realizar la caracterización del material ensayado:

La platina de la cual se mecanizaron las probetas tiene por dimensiones 1/8''x2''x6'', de manera que usaremos la columna seleccionada de la tabla de la norma ASTM A36/A36M – 19:

Tabla 19: Requisitos químicos del acero ASTM A36/A36M – 19 [4]

NOTE 1—Where "... " appears in this table, there is no requirement. The heat analysis for manganese shall be determined and reported as described in the heat analysis section of Specification A6/A6M.

Product	Shapes ^A	Plates > 15-in. [380 mm] Width ^B					Bars; Plates ≤ 15-in. [380 mm] Width ^B			
		To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 2½ [40 to 65], incl	Over 2½ to 4 [65 to 100], incl	Over 4 [100]	To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 4 [100], incl	Over 4 [100]
Thickness, in. [mm]	All									
Carbon, max, %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	0.80–1.20	0.80–1.20	0.85–1.20	0.85–1.20	...	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90
Phosphorus, max, %	0.04	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max, %	0.05	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.40 max
Copper, min, % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

^A Manganese content of 0.85–1.35 % and silicon content of 0.15–0.40 % is required for shapes with flange thickness over 3 in. [75 mm].

^B For each reduction of 0.01 percentage point below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 percentage point manganese above the specified maximum will be permitted, up to the maximum of 1.35 %.

Los resultados del análisis químico:

Tabla 20: Resultados del análisis químico

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono	0.16
Silicio	0.22
Manganeso	0.68
Fósforo	0.018
Azufre	0.013
Cromo	0.12
Níquel	0.07
Cobre	0.21

El acero caracterizado cumple con los requisitos químicos de la norma ASTM A36/A36M – 19.

Del ensayo de metalografía se obtuvo la microestructura del acero estudiado:

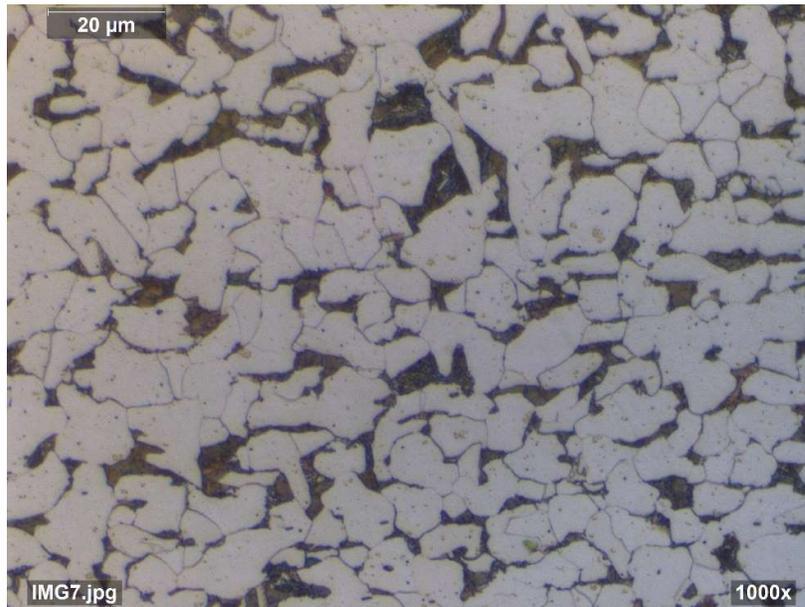


Figura 25: Microestructura del acero en la dirección transversal

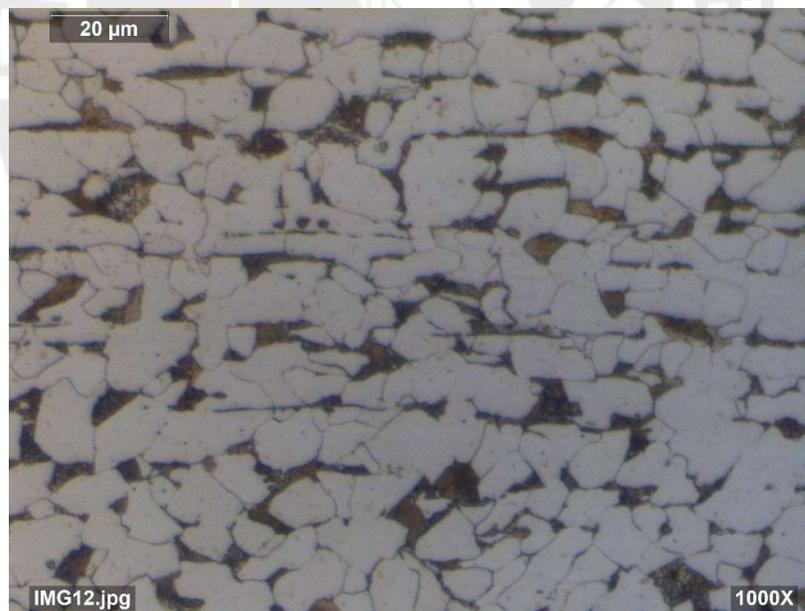


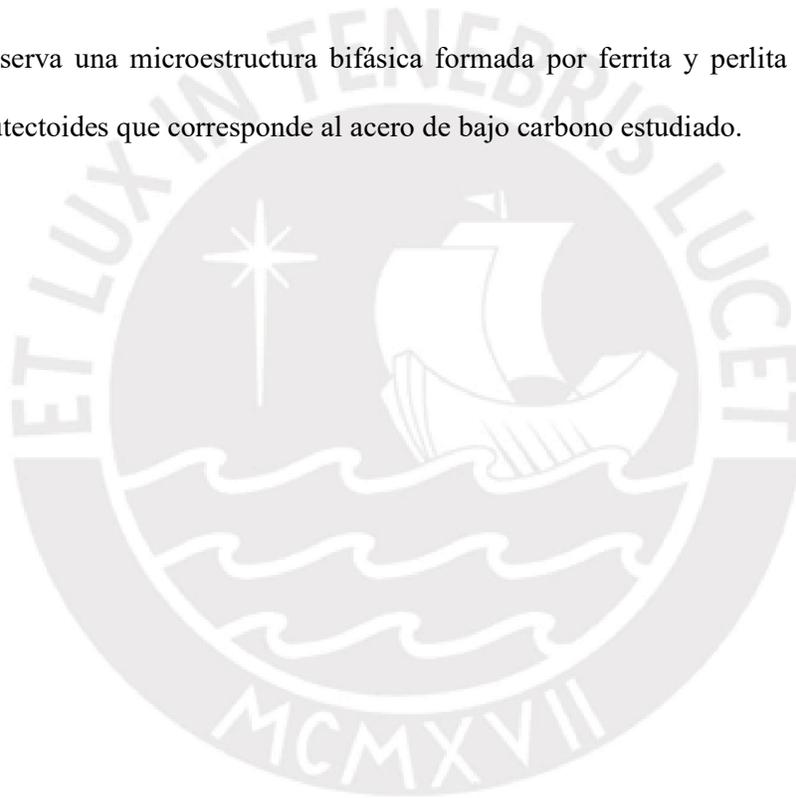
Figura 26: Microestructura del acero en la dirección longitudinal

Asimismo, la microestructura de este acero presenta inclusiones no metálicas las cuales se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 21: Inclusiones no metálicas del acero estudiado

Orientación	Tipo de inclusión	Serie	Severidad
Transversal	A (Sulfuro)	Fina	1.0
Transversal	D (Óxido globular)	Gruesa	2.0
Longitudinal	A (Sulfuro)	Fina	1.0
Longitudinal	D (Óxido globular)	Gruesa	2.0

Se observa una microestructura bifásica formada por ferrita y perlita propia de los aceros hipoeutectoides que corresponde al acero de bajo carbono estudiado.



Según la metodología de ensayo, se realizaron los ensayos para todas las combinaciones de parámetros indicados en el capítulo anterior. Cabe resaltar que, dependiendo del tamaño de probeta, se tendrá una letra al costado del número de probeta, ‘S’ para las probetas subsize y ‘E’ para las estándar.

Los datos de entrada para la máquina de ensayos de tracción son los parámetros del ensayo, así como también la longitud de la sección reducida, la cual es de 32 mm para la probeta subsize y 57 mm para la probeta estándar, el ancho de probeta (“ b_0 ”) y el espesor (“ a_0 ”).

Se usó la máquina de ensayo de tracción universal Zwick Roell Z250 del laboratorio de materiales, con una capacidad de 250 kN y una carrera máxima de 1800 mm.

A continuación, se vuelve a presentar los valores de los parámetros de ensayo para cada caso:

Tabla 22: Parámetros de ensayo para probetas estándar

Probeta estándar	Valor	Unidades
Vbaja	0.86/2.85	mm/min
Vmedia	0.94/15.11	mm/min
Valta	1.03/25.65	mm/min
Tbaja	10	°C
Tmedia	23	°C
Talta	35	°C
E	“Probeta estándar”	-

Tabla 23: Parámetros de ensayo para probetas subsize

Probeta subsize	Valor	Unidades
Vbaja	0.48/1.6	mm/min
Vmedia	0.53/8.48	mm/min
Valta	0.58/14.4	mm/min
Tbaja	10	°C
Tmedia	23	°C
Talta	35	°C
S	“Probeta subsize”	-

Se presenta la data del ensayo tracción, tanto los datos medidos manualmente, así como los medidos usando la máquina de tracción universal, donde:

Los datos medidos manualmente usando un vernier digital calibrado son: ancho, espesor, longitud inicial entre marcas (L_0) y longitud final entre marcas luego de la rotura de la probeta (L_f), de manera que con estos dos últimos se calcula el alargamiento (ϵ). Datos medidos usando la máquina de tracción universal: Fuerza en el punto de fluencia y ($F_{p0.2}$) y fuerza máxima en el punto del esfuerzo de tracción (F_m).

Tabla 24: Relación de probetas estándar

Número de probeta	Parámetros	a _o (mm)	b _o (mm)	Lo (mm)	L _f (mm)	F _{p0.2} (KN)	F _m (KN)
1E	Ta, Va, E	3.20	12.48	50	65.66	15.45	21.11
2E	Ta, Va, E	3.22	12.41	50	63.95	15.90	21.01
3E	Ta, Va, E	3.22	12.41	50	64.75	15.77	21.09
4E	Ta, Vb, E	3.22	12.41	50	65.82	15.20	20.84
5E	Ta, Vb, E	3.22	12.41	50	65.07	15.24	20.81
6E	Ta, Vb, E	3.22	12.41	50	64.93	15.12	20.91
7E	Ta, Vm, E	3.26	12.51	50	64.16	15.55	21.06
8E	Ta, Vm, E	3.22	12.47	50	64.75	15.31	20.93
9E	Ta, Vm, E	3.26	12.45	50	65.26	15.56	20.95
10E	Tm, Va, E	3.18	12.41	50	64.21	15.67	21.06
11E	Tm, Va, E	3.19	12.42	50	64.65	15.62	21.06
12E	Tm, Va, E	3.21	12.41	50	64.71	15.47	21.06
13E	Tm, Vm, E	3.23	12.44	50	65.15	15.92	21.09
14E	Tm, Vm, E	3.25	12.47	50	64.02	17.09	21.18
15E	Tm, Vm, E	3.27	12.44	50	64.57	15.80	21.04
16E	Tm, Vb, E	3.25	12.46	50	65.02	15.15	21.06
17E	Tm, Vb, E	3.25	12.44	50	64.97	15.92	21.06
18E	Tm, Vb, E	3.24	12.48	50	65.13	15.44	21.09
19E	Tb, Va, E	3.24	12.44	50	63.69	16.38	21.66
20E	Tb, Va, E	3.23	12.50	50	63.33	16.13	21.60
21E	Tb, Va, E	3.25	12.47	50	63.93	16.41	21.68
22E	Tb, Vb, E	3.26	12.47	50	65.54	15.80	21.60
23E	Tb, Vb, E	3.24	12.48	50	65.57	15.94	21.59
24E	Tb, Vb, E	3.26	12.47	50	65.43	15.84	21.64
25E	Tb, Vm, E	3.25	12.46	50	65.04	16.52	21.64
26E	Tb, Vm, E	3.25	12.46	50	64.92	16.82	21.66
27E	Tb, Vm, E	3.24	12.47	50	64.98	15.64	21.56

Tabla 25: Relación de probetas subsize

Número de probeta	Parámetros	a _o (mm)	b _o (mm)	Lo (mm)	L _f (mm)	F _{p0.2} (KN)	F _m (KN)
1S	Ta, Va, S	3.26	5.91	25	33.02	7.61	10.34
2S	Ta, Va, S	3.17	6.07	25	33.29	7.48	10.27
3S	Ta, Va, S	3.18	6.03	25	33.57	8.03	10.32
4S	Ta, Vb, S	3.26	6.06	25	33.82	7.63	10.40
5S	Ta, Vb, S	3.24	5.99	25	33.65	7.56	10.07
6S	Ta, Vb, S	3.30	6.03	25	33.12	7.43	10.35
7S	Tb, Va, S	3.19	5.93	25	33.08	7.67	10.39
8S	Tb, Va, S	3.17	6.06	25	33.18	8.34	10.62
9S	Tb, Va, S	3.18	6.07	25	32.97	7.98	10.52
10S	Tb, Vb, S	3.28	6.04	25	33.04	7.78	10.66
11S	Tb, Vb, S	3.17	5.96	25	33.39	7.25	10.20
12S	Tb, Vb, S	3.17	6.03	25	33.51	7.77	10.41
13S	Tm, Va, S	3.19	6.05	25	32.87	8.24	10.46
14S	Tm, Va, S	3.31	5.94	25	32.94	7.85	10.39
15S	Tm, Va, S	3.18	6.05	25	33.17	8.10	10.47
16S	Tm, Vb, S	3.18	5.97	25	33.57	7.32	10.02
17S	Tm, Vb, S	3.19	6.07	25	33.11	7.83	10.32
18S	Tm, Vb, S	3.26	5.98	25	33.26	7.61	10.40
19S	Tb, Vm, S	3.19	6.06	25	33.25	8.11	10.60
20S	Tb, Vm, S	3.17	6.02	25	33.33	7.49	10.37
21S	Tb, Vm, S	3.18	6.01	25	33.54	8.29	10.54
22S	Ta, Vm, S	3.17	5.98	25	33.47	7.41	10.14
23S	Ta, Vm, S	3.27	6.05	25	33.42	7.83	10.51
24S	Ta, Vm, S	3.28	6.02	25	33.67	7.56	10.45

A continuación, se presenta los gráficos de los ensayos de tracción realizados:

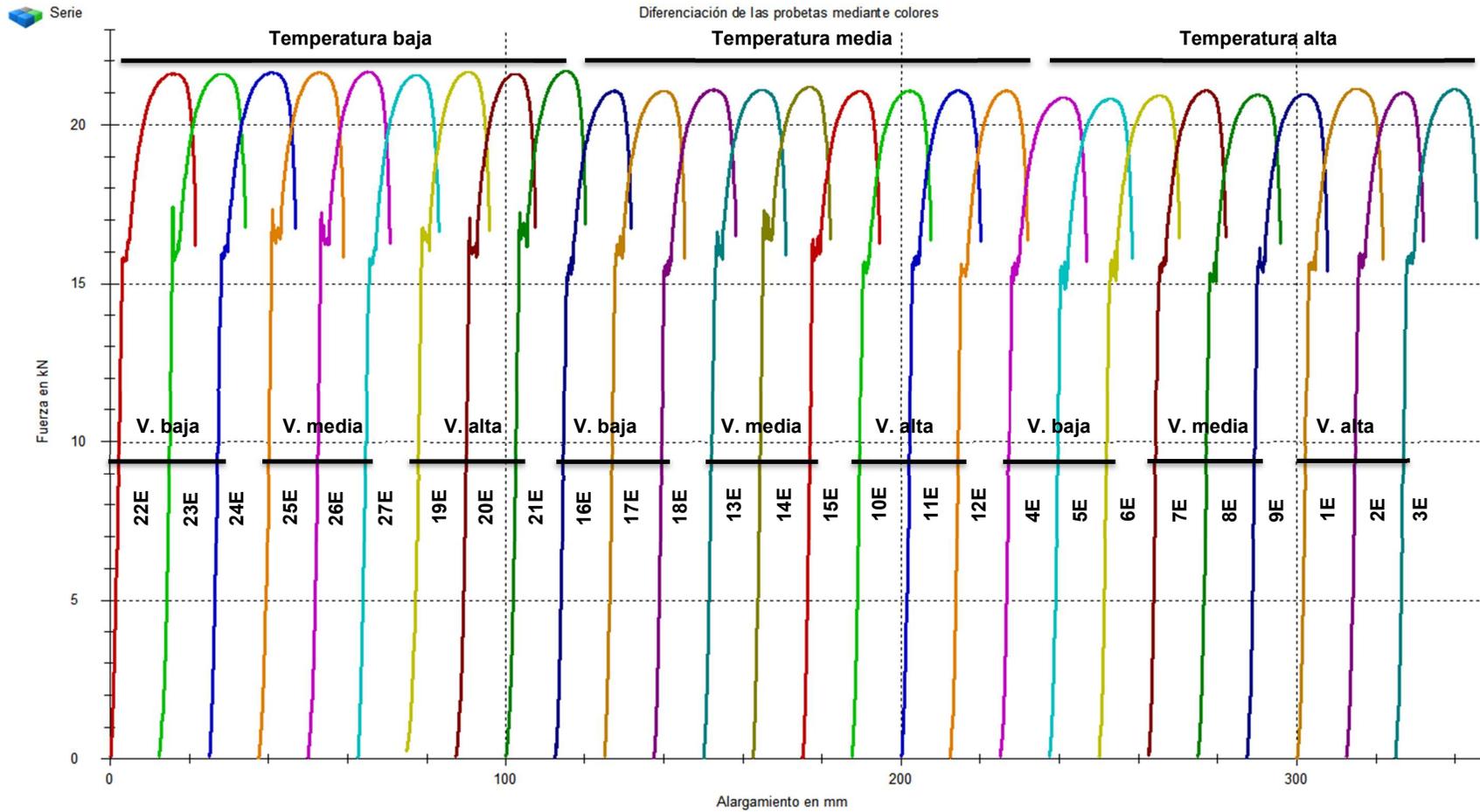


Figura 27: Resultados de ensayos de probetas estándar ordenados por temperatura

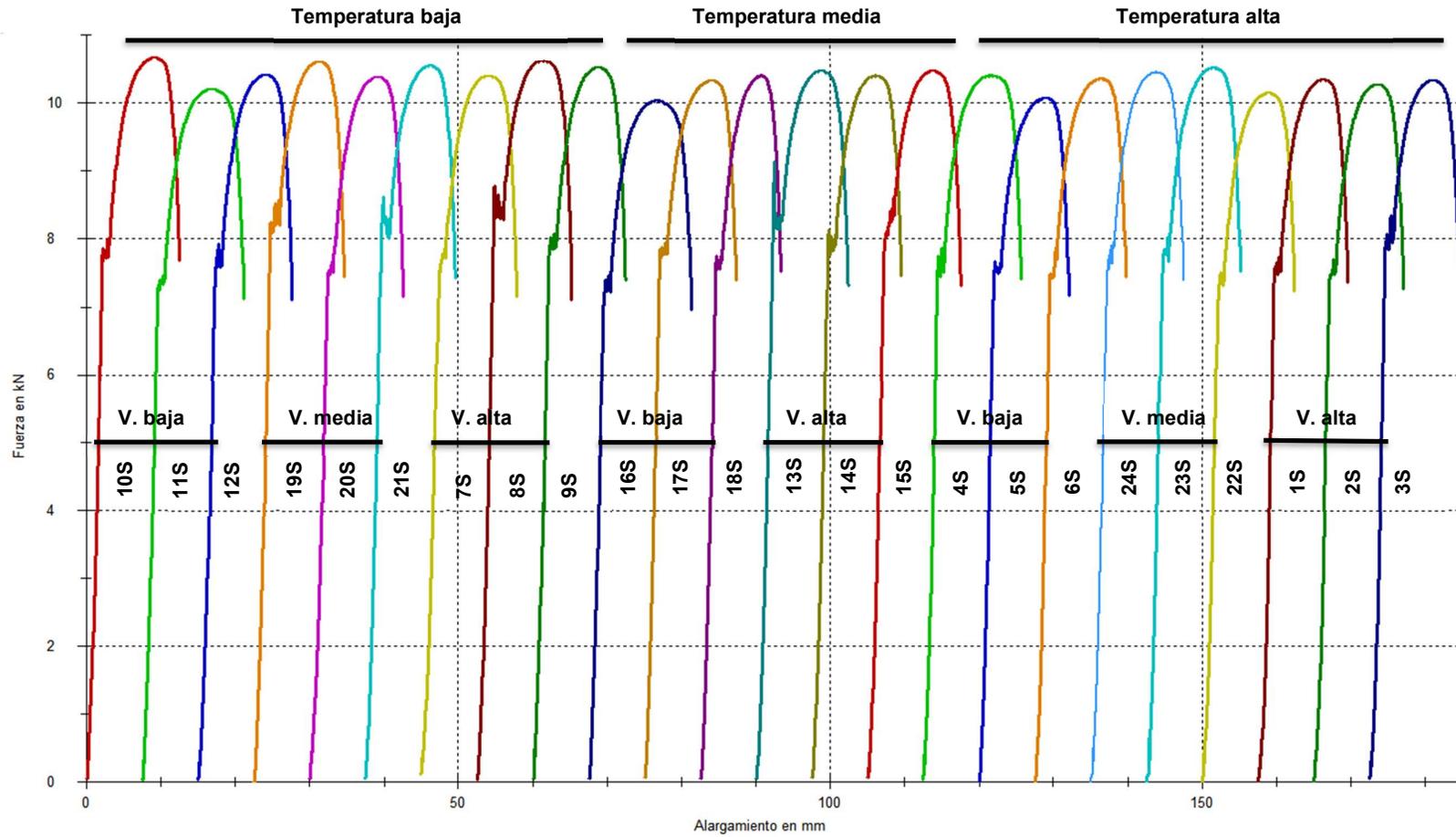


Figura 28: Resultados de ensayos de probetas subsize ordenados por temperatura

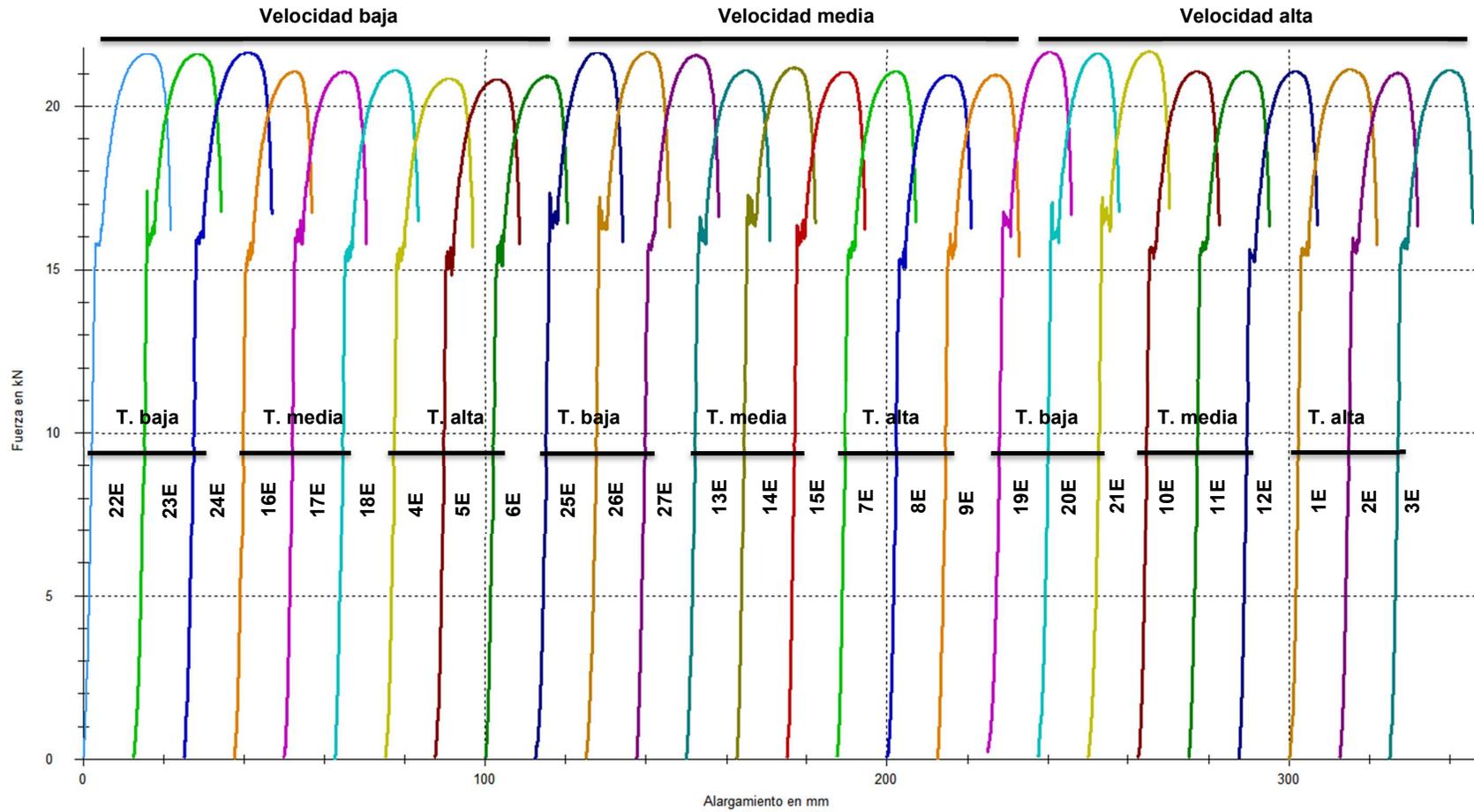


Figura 29: Resultados de ensayos de probetas estándar ordenados por velocidad

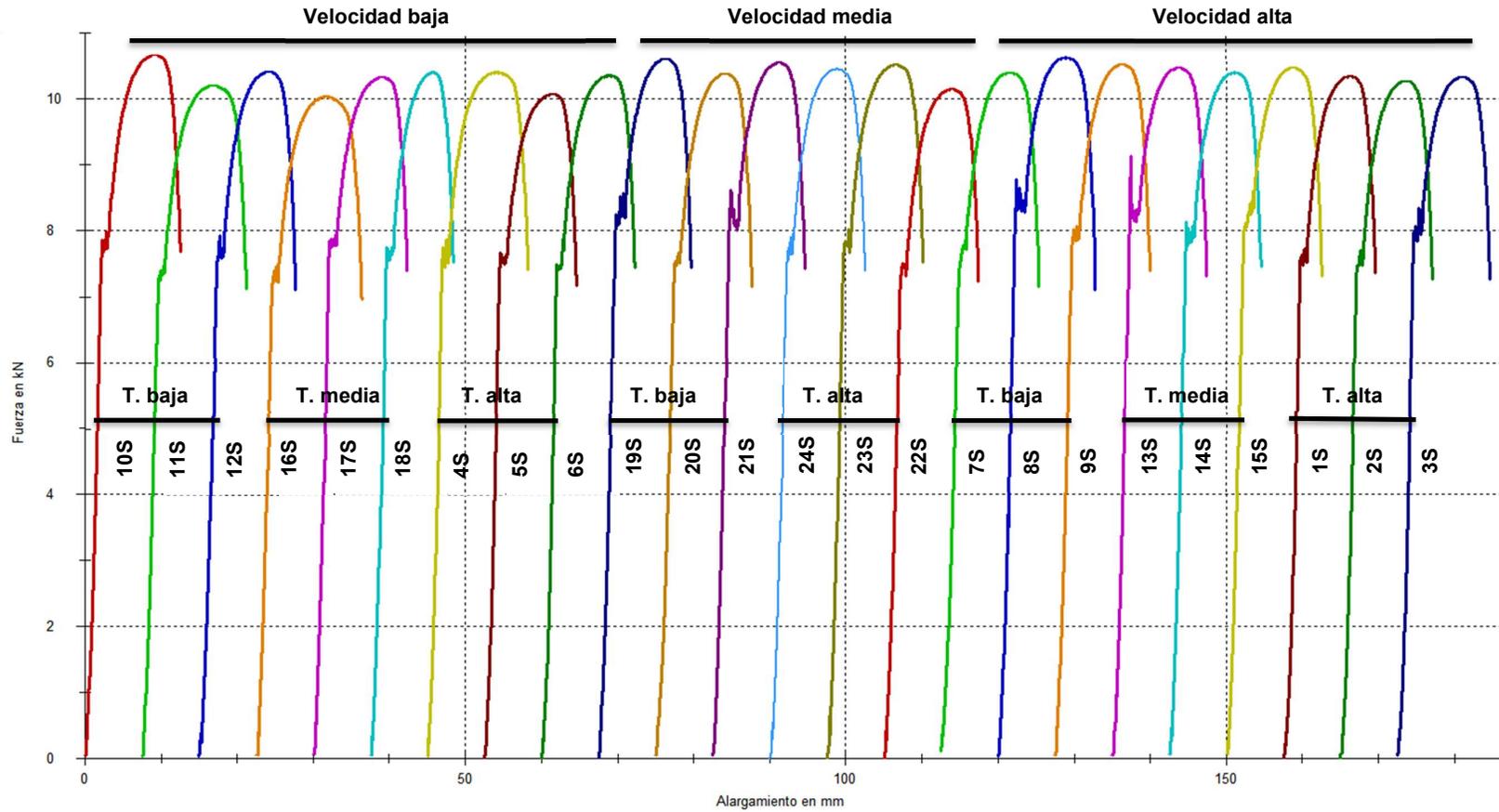


Figura 30: Resultados de ensayos de probetas subsize ordenados por velocidad

3.1. Influencia de la velocidad de ensayo: análisis a temperatura constante

En las siguientes tablas, se presenta un número entre paréntesis debajo de la longitud final entre marcas de la probeta, dicho número es la longitud inicial entre marcas de la probeta.

Se escogió en cada caso una probeta ‘‘promedio’’ debido a que sus valores son más cercanos a los promedios de esfuerzos y alargamiento ya que son las probetas que poseen menor desviación estándar en cada ensayo.

Se detalla la nomenclatura usada en las siguientes tablas:

S_o	:	Área de la sección transversal de la probeta
$R_{p0.2}$:	Esfuerzo de fluencia
R_m	:	Esfuerzo de tracción
T. de ens.	:	Temperatura de ensayo
V. de ens.	:	Velocidad de ensayo
Desv. est.	:	Desviación estándar
L_f	:	Longitud final entre marcas luego de la rotura
ϵ	:	Alargamiento

Tabla 26: Resultados de ensayos de probetas estándar ordenadas por temperatura

Prob.	S _o	R _{p0.2}	R _m	T. de ens.	V. de ens.	R _{p0.2} prom.	R _m prom.	Desv. est.		L _f (50)	L _f prom.	ε	Prob. selec.
								R _{p0.2}	R _m				
	mm ²	MPa	MPa			MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	
1E	39.94	387	529	Ta	Va	393	527	4.6	1.3	65.66	64.79	31	3E
2E	39.96	398	526							63.95		28	
3E	39.96	395	528							64.75		30	
7E	40.78	381	516	Ta	Vm	382	518	0.9	2.4	64.16	64.72	28	7E
8E	40.15	381	521							64.75		30	
9E	40.59	383	516							65.26		31	
4E	39.96	380	521	Ta	Vb	380	522	1.2	1.1	65.82	65.27	32	4E
5E	39.96	381	521							65.07		30	
6E	39.96	378	523							64.93		30	
10E	39.46	397	534	Tm	Va	393	531	3.6	2.0	64.21	64.52	28	11E
11E	39.62	394	532							64.65		29	
12E	39.84	388	529							64.71		29	
13E	40.18	396	525	Tm	Vm	402	522	13.3	3.1	65.15	64.58	30	13E
14E	40.53	422	523							64.02		28	
15E	40.68	388	517							64.57		29	
16E	40.96	374	520	Tm	Vb	383	521	8.1	0.6	65.02	65.04	30	18E
17E	40.43	394	521							64.97		30	
18E	40.44	382	522							65.13		30	
19E	40.31	407	537	Tb	Va	404	536	3.0	1.2	63.69	63.65	27	21E
20E	40.38	399	535							63.33		27	
21E	40.53	405	535							63.93		28	
25E	40.50	408	534	Tb	Vm	404	534	12.0	0.6	65.04	64.98	30	25E
26E	40.50	415	535							64.92		30	
27E	40.40	387	534							64.98		30	
22E	40.65	389	532	Tb	Vb	391	533	2.4	1.0	65.54	65.51	31	24E
23E	40.44	394	534							65.57		31	
24E	40.65	390	532							65.43		31	

Tabla 27: Selección de probetas estándar ordenadas para temperatura de ensayo alta

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
3E	395	528	64.75	30	Valta
7E	381	516	64.16	28	Vmedia
4E	380	521	65.82	32	Vbaja

Tabla 28: Selección de probetas estándar ordenadas para temperatura de ensayo media

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
11E	394	532	64.65	29	Valta
13E	396	525	65.15	30	Vmedia
18E	382	522	65.13	30	Vbaja

Tabla 29: Selección de probetas estándar ordenadas para temperatura de ensayo baja

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
21E	405	535	63.93	28	Valta
25E	408	534	63.93	28	Vmedia
24E	390	532	65.43	31	Vbaja

Tabla 30: Resultados de ensayos de probetas subsize ordenadas por temperatura

Prob.	S _o	R _{p0.2}	R _m	T. de ens.	V. de ens.	R _{p0.2} prom.	R _m prom.	Desv. est.		L _f (50)	L _f prom.	ε	Prob. selec.
								R _{p0.2}	R _m				
	mm ²	MPa	MPa			MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	
1S	19.27	395	537	Ta	Va	401	536	12.9	1.9	33.02	33.29	32	2S
2S	19.24	389	534							33.29		33	
3S	19.18	419	538							33.57		34	
22S	18.96	391	535	Ta	Vm	390	532	5.4	2.4	33.47	33.52	34	22S
23S	19.78	396	531							33.42		34	
24S	19.75	383	529							33.67		35	
4S	19.76	386	526	Ta	Vb	383	522	7.0	3.3	33.82	33.53	35	5S
5S	19.41	390	519							33.65		35	
6S	19.90	374	520							33.12		32	
13S	19.30	427	542	Tm	Va	416	538	11.9	6.8	32.87	32.99	31	14S
14S	19.66	399	529							32.94		32	
15S	19.24	421	544							33.17		33	
16S	18.98	386	528	Tm	Vb	393	531	8.0	2.4	33.57	33.31	34	18S
17S	19.36	404	533							33.11		32	
18S	19.49	390	533							33.26		33	
7S	18.92	405	549	Tb	Va	418	549	12.0	3.3	33.08	33.08	32	7S
8S	19.21	434	553							33.18		33	
9S	19.30	414	545							32.97		32	
19S	19.33	420	549	Tb	Vm	415	548	17.2	3.3	33.25	33.37	33	20S
20S	19.08	392	544							33.33		33	
21S	19.11	434	552							33.54		34	
10S	19.81	393	538	Tb	Vb	395	541	9.4	2.8	33.04	33.31	32	11S
11S	18.89	384	540							33.39		34	
12S	19.12	407	545							33.51		34	

Tabla 31: Selección de probetas subsize ordenadas para temperatura de ensayo alta

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
2S	389	534	33.29	33	Valta
22S	391	535	33.47	34	Vmedia
5S	390	519	33.65	35	Vbaja

Tabla 32: Selección de probetas subsize ordenadas para temperatura de ensayo media

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
14S	399	529	32.94	32	Valta
18S	390	533	33.26	33	Vbaja

Tabla 33: Selección de probetas subsize ordenadas para temperatura de ensayo baja

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	V. de ensayo
	MPa	MPa			
7S	405	549	33.08	32	Valta
20S	392	544	33.33	33	Vmedia
11S	384	540	33.39	34	Vbaja

3.2. Influencia de la temperatura de ensayo: análisis a velocidad constante

Tabla 34: Resultados de ensayos de probetas estándar ordenadas por velocidad

Prob.	S _o	R _{p0.2}	R _m	T. de ens.	V. de ens.	R _{p0.2} prom.	R _m prom.	Desv. est.		L _f (50)	L _f prom.	ε	Prob. selec.
								R _{p0.2}	R _m				
	mm ²	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	%		
1E	39.94	387	529	Ta	Va	393	527	4.6	1.3	65.66	64.79	31	3E
2E	39.96	398	526							63.95		28	
3E	39.96	395	528							64.75		30	
10E	39.46	397	534	Tm	Va	393	531	3.6	2.0	64.21	64.52	28	11E
11E	39.62	394	532							64.65		29	
12E	39.84	388	529							64.71		29	
19E	40.31	407	537	Tb	Va	404	536	3.0	1.2	63.69	63.65	27	21E
20E	40.38	399	535							63.33		27	
21E	40.53	405	535							63.93		28	
7E	40.78	381	516	Ta	Vm	382	518	0.9	2.4	64.16	64.72	28	7E
8E	40.15	381	521							64.75		30	
9E	40.59	383	516							65.26		31	
13E	40.18	396	525	Tm	Vm	402	522	13.3	3.1	65.15	64.58	30	13E
14E	40.53	422	523							64.02		28	
15E	40.68	388	517							64.57		29	
25E	40.50	408	534	Tb	Vm	404	534	12.0	0.6	65.04	64.98	30	25E
26E	40.50	415	535							64.92		30	
27E	40.40	387	534							64.98		30	
4E	39.96	380	521	Ta	Vb	380	522	1.2	1.1	65.82	65.27	32	4E
5E	39.96	381	521							65.07		30	
6E	39.96	378	523							64.93		30	
16E	40.96	374	520	Tm	Vb	383	521	8.1	0.6	65.02	65.04	30	18E
17E	40.43	394	521							64.97		30	
18E	40.44	382	522							65.13		30	
22E	40.65	389	532	Tb	Vb	391	533	2.4	1.0	65.54	65.51	31	24E
23E	40.44	394	534							65.57		31	
24E	40.65	390	532							65.43		31	

Tabla 35: Selección de probetas estándar ordenadas para velocidad de ensayo alta

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
3E	395	528	64.75	30	Talta
11E	394	532	64.65	29	Tmedia
21E	405	535	63.93	28	Tbaja

Tabla 36: Selección de probetas estándar ordenadas para velocidad de ensayo media

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
7E	381	516	64.16	28	Talta
13E	396	525	65.15	30	Tmedia
25E	408	534	65.04	30	Tbaja

Tabla 37: Selección de probetas estándar ordenadas para velocidad de ensayo baja

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
4E	380	521	65.82	32	Talta
18E	382	522	65.13	30	Tmedia
24E	390	532	65.43	31	Tbaja

Tabla 38: Resultados de ensayos de probetas subsize ordenadas por velocidad

Prob.	S _o	R _{p0.2}	R _m	T. de ens.	V. de ens.	R _{p0.2} prom.	R _m prom.	Desv. est.		L _f (50)	L _f prom.	ε	Prob. selec.
								R _{p0.2}	R _m				
	mm ²	MPa	MPa			MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	
1S	19.27	395	537	Ta	Va	401	536	12.9	1.9	33.02	33.29	32	2S
2S	19.24	389	534							33.29		33	
3S	19.18	419	538							33.57		34	
13S	19.30	427	542	Tm	Va	416	538	11.9	6.8	32.87	32.99	31	14S
14S	19.66	399	529							32.94		32	
15S	19.24	421	544							33.17		33	
7S	18.92	405	549	Tb	Va	418	549	12.0	3.3	33.08	33.08	32	7S
8S	19.21	434	553							33.18		33	
9S	19.30	414	545							32.97		32	
22S	18.96	391	535	Ta	Vm	390	532	5.4	2.4	33.47	33.52	34	22S
23S	19.78	396	531							33.42		34	
24S	19.75	383	529							33.67		35	
19S	19.33	420	549	Tb	Vm	415	548	17.2	3.3	33.25	33.37	33	20S
20S	19.08	392	544							33.33		33	
21S	19.11	434	552							33.54		34	
4S	19.76	386	526	Ta	Vb	383	522	7.0	3.3	33.82	33.53	35	5S
5S	19.41	390	519							33.65		35	
6S	19.90	374	520							33.12		32	
16S	18.98	386	528	Tm	Vb	393	531	8.0	2.4	33.57	33.31	34	18S
17S	19.36	404	533							33.11		32	
18S	19.49	390	533							33.26		33	
10S	19.81	393	538	Tb	Vb	395	541	9.4	2.8	33.04	33.31	32	11S
11S	18.89	384	540							33.39		34	
12S	19.12	407	545							33.51		34	

Tabla 39: Selección de probetas subsize para velocidad de ensayo alta

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
2S	389	534	33.29	33	Talta
14S	399	529	32.94	32	Tmedia
7S	405	549	33.08	32	Tbaja

Tabla 40: Selección de probetas subsize ordenadas para velocidad de ensayo media

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
22S	391	535	33.47	34	Talta
20S	392	544	33.33	33	Tbaja

Tabla 41: Selección de probetas subsize ordenadas para velocidad de ensayo baja

Probeta	R _{p0.2}	R _m	L _f (mm)	ε (%)	T. de ensayo
	MPa	MPa			
5S	390	519	33.65	35	Talta
18S	390	533	33.26	33	Tmedia
11S	384	540	33.39	34	Tbaja

3.3. Influencia de la geometría de la probeta:

En el caso de la influencia de la geometría de la probeta, se comparará los ensayos realizados a una misma combinación de parámetros para un diferente tamaño de probeta. Cabe resaltar que para analizar el alargamiento es necesario comparar ambas probetas para una misma longitud inicial entre marcas, por lo cual en las probetas estándar se midieron dos longitudes iniciales entre marcas, una de 50 mm y otra de 25 mm, esta última se usará para analizar la influencia de la geometría de la probeta en el alargamiento.

Las probetas elegidas tienen valores más cercanos a los valores promedio debido a que son las probetas que poseen menor desviación estándar para cada ensayo.

Tabla 42: Selección de probetas ordenadas por tamaño de probeta y temperatura

Prob.	S_o	$R_{p0.2}$	R_m	T. de	V. de	L_f	ϵ
	mm ²	MPa	MPa	ens.	ens.	(25) mm	%
3E	39.96	395	528	Ta	Va	34.55	38
2S	19.24	389	534			33.29	33
7E	40.78	381	516	Ta	Vm	34.79	39
22S	18.96	391	535			33.47	34
4E	39.96	380	521	Ta	Vb	35.48	42
5S	19.41	390	519			33.65	35
11E	39.62	394	532	Tm	Va	34.36	37
14S	19.66	399	529			32.94	32
18E	40.44	382	522	Tm	Vb	35.48	42
18S	19.49	390	533			33.26	33
21E	40.53	405	535	Tb	Va	34.26	37
7S	18.92	405	549			33.08	32
25E	40.50	408	534	Tb	Vm	35.05	40
20S	19.08	392	544			33.33	33
24E	40.65	390	532	Tb	Vb	35.40	42
11S	18.89	384	540			33.39	34

3.4. Discusión de resultados y comentarios:

Luego de los ensayos de caracterización realizados (análisis químico, metalografía y tracción) se verifica que el material estudiado cumple con los requerimientos del acero estructural de bajo carbono laminado en caliente A36. Se han verificado las propiedades mecánicas (esfuerzo de fluencia, esfuerzo último de tracción y alargamiento) así como también la composición química con la norma ASTM A36/A36M – 19.

3.4.1. Probetas subsize:

En el caso de las probetas subsize, el parámetro de la geometría fue determinante, ya que se tiene mayor dispersión que en el caso de las probetas estándar, lo cual se puede observar en los resultados de esfuerzo de fluencia y esfuerzo de tracción que tienen una desviación estándar de hasta 17.2, de manera que no se analizarán los esfuerzos en el caso de las probetas subsize ya que los resultados presentan demasiada dispersión.

Sin embargo, en el caso del alargamiento se tiene una repetibilidad aceptable, lo cual será aprovechado para poder analizar estos resultados y posteriormente compararlos con los obtenidos para las probetas estándar.

3.4.1.1. Alargamiento:

3.4.1.1.1. Temperatura de ensayo alta:

A medida que aumenta la velocidad de ensayo disminuye el alargamiento; este comportamiento es similar a lo presentado en el primer capítulo del presente estudio al analizar diferentes publicaciones y estudios. Se obtuvo una variación de 6% en el alargamiento.

3.4.1.1.2. Temperatura de ensayo media:

En esta condición no se encuentran cambios significativos al variar la velocidad del ensayo. Se obtuvo una variación de 3% en el alargamiento.

3.4.1.1.3. Temperatura de ensayo baja:

De igual manera que en el punto 3.4.1.1.1. (temperatura de ensayo alta), a medida que aumenta la velocidad de ensayo el alargamiento disminuye. Se obtuvo una variación de 6% en el alargamiento.

3.4.1.1.4. Velocidad de ensayo alta:

No se observa un incremento apreciable en el alargamiento para las temperaturas baja y media, mientras que a temperatura alta se observa un ligero aumento en el alargamiento. Se obtuvo una variación de 3% en el alargamiento.

3.4.1.1.5. Velocidad de ensayo media:

En esta condición no se encuentran cambios significativos al variar la temperatura de ensayo. Se obtuvo una variación de 3% en el alargamiento.

3.4.1.1.6. Velocidad de ensayo baja:

El alargamiento aumenta a medida que se incrementa la temperatura. Sin embargo, para la temperatura media de ensayo se obtuvo un alargamiento menor al alargamiento para la temperatura baja pero el alargamiento obtenido para la temperatura de ensayo alta es el mayor de los tres, de manera que esta variación está dentro de la dispersión del ensayo. Se obtuvo una variación de 6% en el alargamiento.

Según el análisis de la influencia de la velocidad de ensayo se observa que el alargamiento varía al aumentar o disminuir la velocidad de ensayo para una temperatura de ensayo constante, de manera que el parámetro más influyente es la velocidad de ensayo. Los máximos valores de alargamiento se obtienen para la velocidad de ensayo baja.

Según el análisis de la influencia de la temperatura de ensayo no se encuentran cambios significativos al aumentar o disminuir la temperatura de ensayo para una velocidad de ensayo constante.

3.4.2. Probetas estándar:

3.4.2.1. Esfuerzos:

3.4.2.1.1. Temperatura de ensayo alta:

El esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo último a la tracción se incrementan al aumentar la velocidad de ensayo. Se obtuvo variaciones de 4% en el esfuerzo de fluencia y 2% en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.1.2. Temperatura de ensayo media:

Se tiene un comportamiento similar al de temperatura alta, a medida que aumenta la velocidad de ensayo se incrementan los esfuerzos. Por otro lado, se observa que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último a la tracción son menores en comparación de los esfuerzos obtenidos a temperatura baja, lo cual es un resultado esperado, ya que al aumentar la temperatura las propiedades mecánicas disminuyen. Se obtuvo variaciones de 4% en el esfuerzo de fluencia y 2% en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.1.3. Temperatura de ensayo baja:

El esfuerzo a la fluencia y el esfuerzo último a la tracción se incrementan a medida que se incrementa la velocidad de ensayo. Cabe resaltar que recién para la condición de temperatura de ensayo baja se tienen cambios significativos en los esfuerzos. Se obtuvo variaciones de 5% en el esfuerzo de fluencia y 1% en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.1.4. Velocidad de ensayo alta:

No se encuentran cambios significativos en los resultados obtenidos a temperatura alta y media. Sin embargo, a temperatura de ensayo baja se tiene un incremento de la resistencia, tanto del esfuerzo de fluencia como del esfuerzo último a la tracción. Se obtuvo variaciones de 3% en el esfuerzo de fluencia y 1% en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.1.5. Velocidad de ensayo media:

A medida que se reduce la temperatura se observa un incremento de la resistencia, tanto del esfuerzo de fluencia como del esfuerzo último a la tracción. Se obtuvo variaciones de 7% en el esfuerzo de fluencia y 3% en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.1.6. Velocidad de ensayo baja:

De manera similar al caso de la velocidad de ensayo alta (punto 3.4.2.1.4.), no se encuentran cambios significativos en los resultados obtenidos a temperatura alta y media. Sin embargo, a temperatura de ensayo baja se tiene un incremento de la resistencia, tanto del esfuerzo de fluencia como del esfuerzo último a la tracción. Se obtuvo variaciones de 3% en el esfuerzo de fluencia y 2% en el esfuerzo último a la tracción.

Según los análisis de la influencia de la velocidad y la temperatura de ensayo, se tiene que el parámetro más influyente en los resultados de los esfuerzos es la temperatura de ensayo baja, lo cual se comprueba analizando las figuras 27 y 29, en las cuales se observa claramente que para la condición de temperatura de ensayo baja se tiene un aumento sustancial tanto en el esfuerzo de fluencia como en el esfuerzo último a la tracción.

3.4.2.2. Alargamiento:

3.4.2.2.1. Temperatura de ensayo alta:

El alargamiento aumenta a medida que disminuye la velocidad de ensayo. Se obtuvo una variación de 14% en el alargamiento.

3.4.2.2.2. Temperatura de ensayo media:

En esta condición no se encuentran cambios significativos en el alargamiento al variar la velocidad del ensayo. Se obtuvo una variación de 3% en el alargamiento.

3.4.2.2.3. Temperatura de ensayo baja:

No hay cambios en el alargamiento para las velocidades alta y media. Sin embargo, para la velocidad de ensayo baja se tiene un aumento en el alargamiento. Se obtuvo una variación de 11% en el alargamiento.

3.4.2.2.4. Velocidad de ensayo alta:

A medida que se incrementa la temperatura de ensayo se observa que el alargamiento aumenta. Se obtuvo una variación de 7% en el alargamiento.

3.4.2.2.5. Velocidad de ensayo media:

Para la velocidad de ensayo media, no se tiene un cambio significativo en el alargamiento entre los ensayos a temperatura media con los ensayos a temperatura baja. Se obtuvo una variación de 7% en el alargamiento.

3.4.2.2.6. Velocidad de ensayo baja:

De manera similar al punto 3.4.2.2.4. (velocidad de ensayo alta), el alargamiento aumenta a medida que se incrementa la temperatura de ensayo. Además, para esta condición se tienen los mayores valores de alargamiento comparado a los demás ensayos. Se obtuvo una variación de 7% en el alargamiento.

Según el análisis de la influencia de la velocidad de ensayo se observa que el alargamiento se modifica al aumentar o disminuir la velocidad de ensayo para una temperatura de ensayo constante, de manera que el parámetro más influyente es la velocidad de ensayo baja, ya que los máximos valores de alargamiento se obtienen para esta velocidad.

Según el análisis de la influencia de la temperatura de ensayo se observa que el alargamiento aumenta al incrementarse la temperatura de ensayo para una velocidad de ensayo constante. Sin embargo, los máximos valores de alargamiento se obtienen para la velocidad de ensayo baja y sólo para la temperatura de ensayo alta se tiene un cambio significativo en el

alargamiento, por lo que el parámetro que tiene mayor predominancia en los resultados es la velocidad de ensayo baja.



3.4.3. Variación de resultados: temperatura de ensayo y velocidad de ensayo

Se tiene lo siguiente:

Variación: Es obtenida entre los valores máximos y mínimos de los resultados de los ensayos para cada condición.

Por cada "condición" se tiene de dos a tres ensayos. Por ejemplo, para las probetas estándar a temperatura alta constante se tiene ensayos a velocidad baja, media y alta.

A continuación, se muestra la variación de los esfuerzos y el alargamiento al modificar la temperatura de ensayo y velocidad de ensayo:

Tabla 43: Variación de los esfuerzos y alargamiento de probetas estándar

Condición	Variación (MPa, %)		
	$R_{p0.2}$	R_m	ϵ
Ta=cte	15	12	4
Tm=cte	14	10	1
Tb=cte	18	3	3
Va=cte	11	7	2
Vm=cte	27	18	2
Vb=cte	10	11	2

Tabla 44: Variación porcentual de los esfuerzos y alargamiento de probetas estándar

Condición	Variación (%)		
	$R_{p0.2}$	R_m	ϵ
Ta=cte	4	2	14
Tm=cte	4	2	3
Tb=cte	5	1	11
Va=cte	3	1	7
Vm=cte	7	3	7
Vb=cte	3	2	7

Tabla 45: Variación de los esfuerzos y alargamiento de probetas subsize

Condición	Variación (MPa, %)		
	$R_{p0.2}$	R_m	ϵ
Ta=cte	-	-	2
Tm=cte	-	-	1
Tb=cte	-	-	2
Va=cte	-	-	1
Vm=cte	-	-	1
Vb=cte	-	-	2

Tabla 46: Variación porcentual de los esfuerzos y alargamiento de probetas subsize

Condición	Variación (%)		
	$R_{p0.2}$	R_m	ϵ
Ta=cte	-	-	6
Tm=cte	-	-	3
Tb=cte	-	-	6
Va=cte	-	-	3
Vm=cte	-	-	3
Vb=cte	-	-	6

Se tiene una variación máxima de 7% en el esfuerzo de fluencia en la campaña experimental de las probetas estándar, la cual se obtuvo para la condición de velocidad de ensayo media constante.

Se tiene una variación máxima de 3% en el esfuerzo último a la tracción en la campaña experimental de las probetas estándar, la cual se obtuvo para la condición de velocidad de ensayo media constante.

Se tiene una variación máxima de 14% en el alargamiento en la campaña experimental de las probetas estándar, la cual se obtuvo para la condición de temperatura de ensayo alta

constante.

Se tiene una variación máxima de 6% en el alargamiento en la campaña experimental de las probetas subsize, la cual se obtuvo para la condición de temperatura de ensayo baja constante.

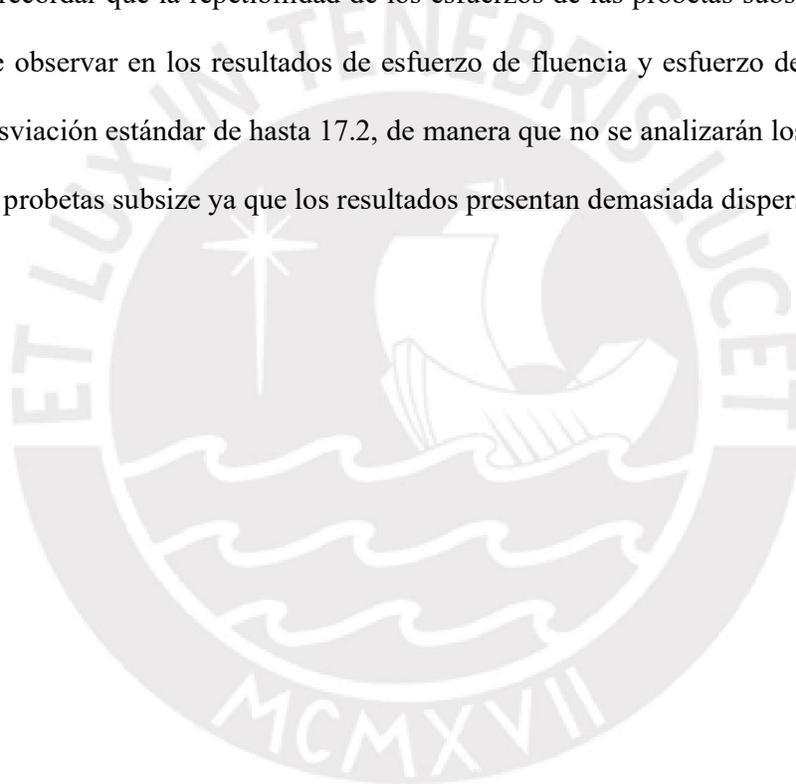


3.4.4. Variación de resultados: geometría de la probeta

La máxima diferencia encontrada entre los valores de alargamiento para probetas estándar y subsize es de 9%, la cual se da para la temperatura de ensayo media y velocidad de ensayo baja, así como el error relativo tomando como referencia el alargamiento de la probeta estándar es de 21%.

Al comparar el alargamiento de ambas probetas se observa que las probetas estándar tienen un mayor alargamiento que las probetas subsize en todos los casos.

Cabe recordar que la repetibilidad de los esfuerzos de las probetas subsize es baja, lo cual se puede observar en los resultados de esfuerzo de fluencia y esfuerzo de tracción que tienen una desviación estándar de hasta 17.2, de manera que no se analizarán los esfuerzos en el caso de las probetas subsize ya que los resultados presentan demasiada dispersión.



3.4.5. Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada:

3.4.5.1. Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada:

Temperatura de ensayo

3.4.5.1.1. Alargamiento

Revisando los resultados de alargamiento obtenidos tanto para las probetas estándar como las probetas subsize se comprueba que el incremento de la temperatura trae consigo el aumento del alargamiento.

Esto ha sido abordado por los autores de los estudios 1 y 5 del capítulo 1:

Estudio 1:

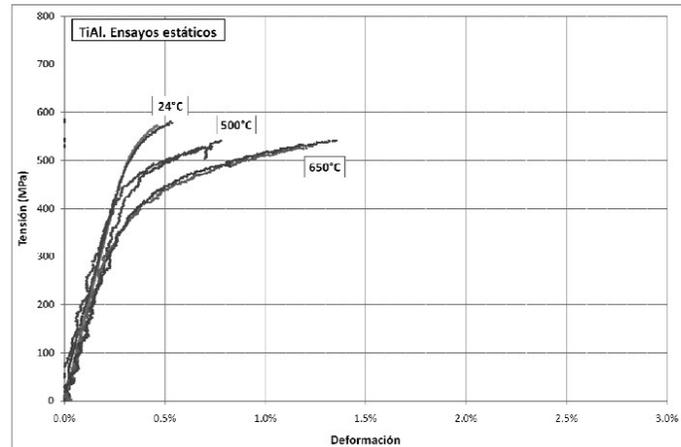


Figura 31: Curvas tensión-deformación obtenidas en los ensayos estáticos [17]

Estudio 5:

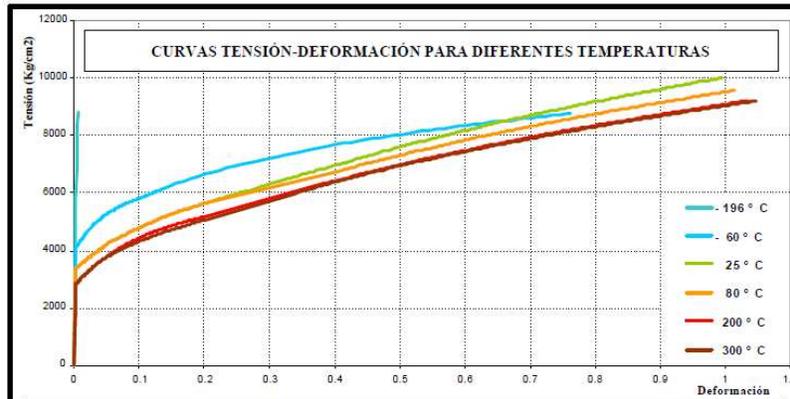


Figura 32: Curva Esfuerzo vs deformación real para diferentes temperaturas. [15]

Además, al tener una alta temperatura de ensayo con una baja velocidad de ensayo, la variación del alargamiento será mucho mayor, vale recordar que las variaciones del alargamiento encontradas en este estudio son de 6% en las probetas subsize y de 14% en las probetas estándar.

3.4.5.1.2. Esfuerzos

De manera similar, de los resultados del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de tracción obtenidos en la campaña experimental se comprueba que el incremento de la temperatura trae consigo la disminución tanto del esfuerzo de fluencia como el esfuerzo de tracción.

Lo expuesto en el párrafo anterior se comprueba en las figuras 29 y 30, ya que se observa que a medida que la temperatura incrementa el material presenta un comportamiento más dúctil. Sin embargo, esto también provoca que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo a la tracción del material disminuyan.

Además, se observa que los mayores valores de los esfuerzos (tanto la fluencia y el esfuerzo a la tracción) se obtienen para la temperatura más baja de ensayo, vale recordar que las variaciones en los esfuerzos encontrados en este estudio son de 7% en el esfuerzo de fluencia y de 3% en el esfuerzo de tracción para las probetas estándar.

La variación de la fluencia tiende a ser mayor que la variación del esfuerzo a la tracción debido a que la fluencia se produce luego del pico en la curva Esfuerzo vs Deformación y debido a que el pico de tensión tiene baja repetibilidad, así también la fluencia tendrá una menor repetibilidad en comparación del esfuerzo a la tracción, el cual presenta mayor repetibilidad ya que este se alcanza para la carga máxima. Cabe resaltar que el esfuerzo de fluencia es el promedio de las tensiones asociadas con el límite elástico inferior, lo expuesto anteriormente es abordado por Callister:

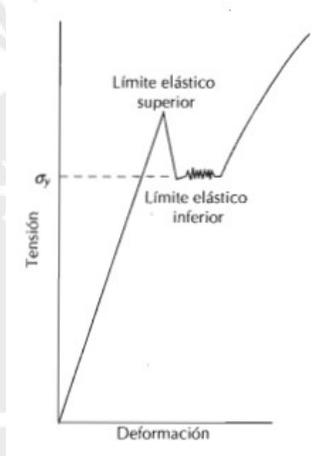


Figura 33: Curva Esfuerzo vs Deformación típica de aceros que presentan el fenómeno de la discontinuidad de la fluencia. [11]

3.4.5.2. Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada:

Velocidad de ensayo

3.4.5.2.1. Alargamiento

De los resultados de alargamiento obtenidos tanto para las probetas estándar como las probetas subsized se comprueba que la disminución de la velocidad de ensayo trae consigo el aumento del alargamiento.

Este comportamiento ha sido estudiado y comprobado por los autores de los estudios 2 y 6 del capítulo 1.

También se puede observar que el aumento de la velocidad de deformación (lo que aumenta a su vez la velocidad de separación de mordazas) conduce a una disminución de la reducción de área, en otras palabras, una disminución de la ductilidad. La reducción de la ductilidad se puede evidenciar al observar que los esfuerzos tanto de tracción y el esfuerzo de fluencia aumentan a medida que se reduce el área, ya que al reducir el área el esfuerzo aumenta. Además, esta reducción en la ductilidad puede observarse también analizando el ratio entre el esfuerzo de tracción y el esfuerzo de fluencia ($\text{Esfuerzo de tracción/Esfuerzo de fluencia}$), basándonos en el estudio 4, a medida que el ratio disminuye también disminuye la ductilidad, esto debido que el esfuerzo de fluencia es más sensible al aumento de la velocidad de deformación, por ende, este tenderá a aumentar más que el esfuerzo a la tracción, de manera que la tendencia del ratio será decreciente. Además, al aumentar el esfuerzo de fluencia la curva Esfuerzo vs Deformación tiende a elevarse más, lo que traería consigo el decremento de la ductilidad, ya que un material al tener un esfuerzo de fluencia elevado tiende a tener un comportamiento menos dúctil.

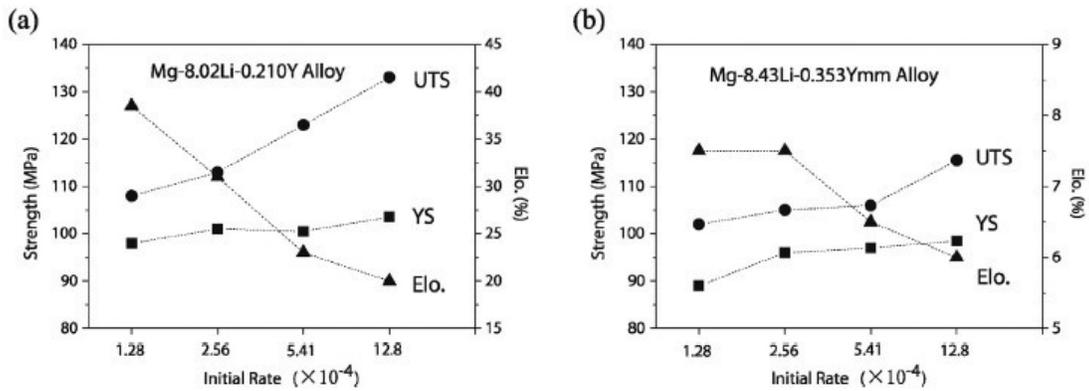


Figura 34: Propiedades de las aleaciones de Mg-8.02Li-0.210Y (a) y Mg-8.43Li-0.353Ymm (b) para distintas velocidades de deformación a temperatura ambiente [18]

3.4.5.2.2. Esfuerzos

De los resultados del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo a la tracción obtenidos en los ensayos para probetas estándar se evidencia que estas propiedades del acero estudiado presentan sensibilidad a la velocidad de deformación, ya que al aumentar la velocidad de ensayo se incrementa el esfuerzo:

Esta tendencia ha sido estudiada y comprobada por los autores de los estudios 2 y 6 del capítulo 1.

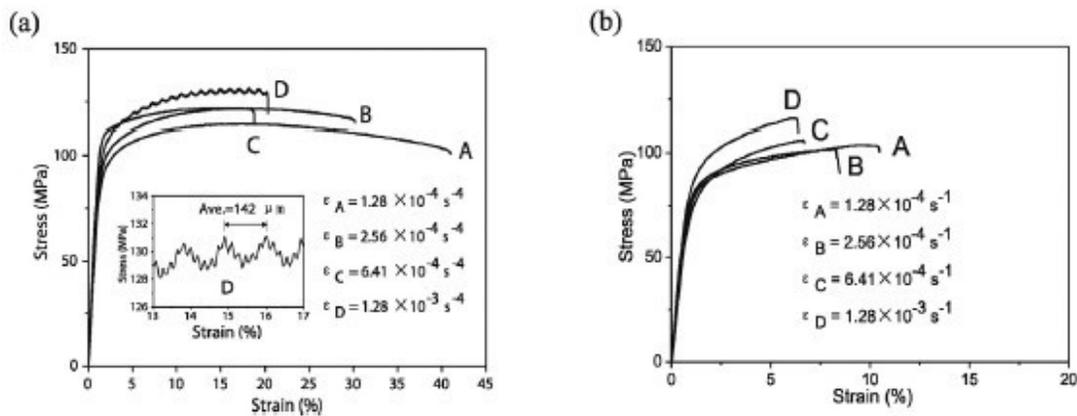
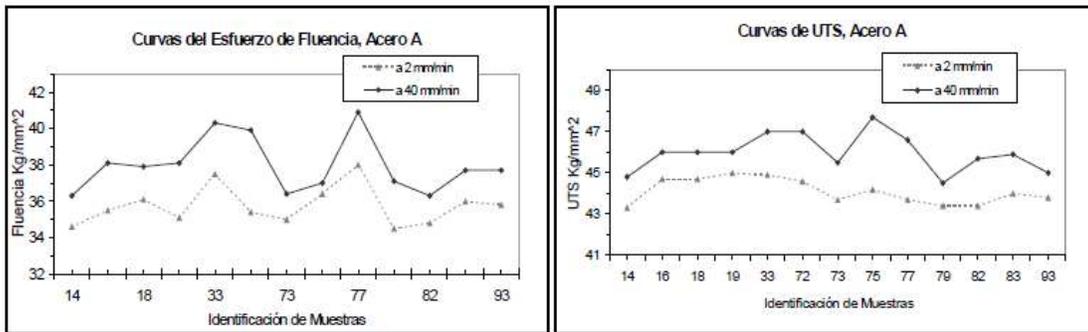


Figura 35: Gráficos de esfuerzo vs deformación de las aleaciones para diferentes tasas de deformación. Mg-8.02Li-0.210Y (a) y Mg-8.43Li-0.353Ymm (b) [18]



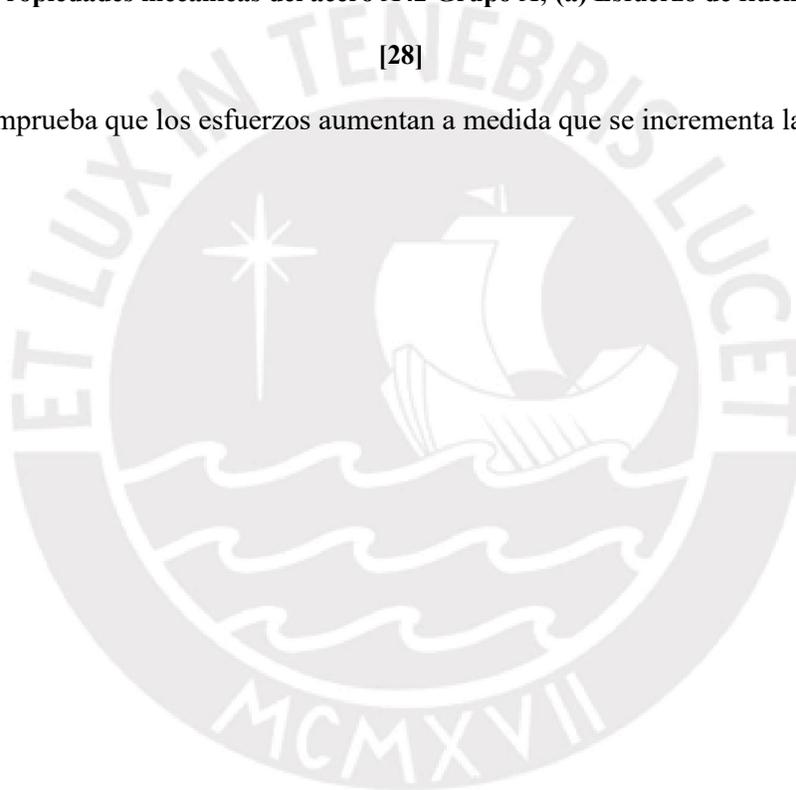
(a)

(b)

Figura 36: Propiedades mecánicas del acero A42 Grupo A; (a) Esfuerzo de fluencia; (b) UTS

[28]

Se comprueba que los esfuerzos aumentan a medida que se incrementa la velocidad de ensayo.



3.4.5.3. Comentarios y comparación de los resultados con la bibliografía consultada:

Geometría de la probeta

3.4.5.3.1. Alargamiento

De los resultados del alargamiento obtenidos para ambas probetas se comprueba que el alargamiento disminuye cuando se usan probetas subsize. Cabe recordar que la máxima diferencia encontrada entre los valores del alargamiento para probetas subsize y estándar es de 9%, la cual se da a temperatura de ensayo media y velocidad de ensayo baja, así como el error relativo tomando como referencia el alargamiento de la probeta estándar es de 21%.

Este comportamiento se observa en el estudio 4 del capítulo 1:

Tabla 47: Resultados del ensayo de tracción del acero API-5L utilizado en la experimentación.

[31]

Orientación de las Probetas	N	E (MPa)			σ_{ys} (MPa)			σ_{UTS} (MPa)			% Elongación		
		\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.	\bar{x}	s	% C.V.
Lstd	5	202031	1117	0,55	394	3,41	0,87	521	3,65	0,70	28	0,91	3,25
Cstd	5	214731	3234	1,51	427	3,87	0,91	538	1,81	0,34	27	1,81	6,70
Lmini	5	185756	5003	2,69	442	28,12	6,36	533	5,87	1,10	21	3,89	18,52
Cmini	5	206767	9644	4,66	443	41,98	9,48	542	15,99	2,95	20	4,42	22,10
Rmini	9	198721	6279	1,72	355	26,45	4,40	491	15,77	1,92	25	4,96	19,16

Debido a que la probeta estándar tiene una mayor sección sufre más deformación en comparación a la probeta subsize, por lo que puede elongarse más y así el alargamiento es mayor en la probeta estándar.

Por otro lado, la deformación localizada cerca de la superficie de rotura está contenida dentro de la longitud entre marcas de 25mm, al usar esta longitud entre marcas para las probetas estándar, evidentemente gran parte de la longitud entre marcas corresponderá a la zona de la deformación localizada cerca de la superficie de rotura que es la zona de la probeta que más cambio presenta en su longitud; en el caso de la probeta subsize, al tener una sección menor a

su vez la zona de deformación localizada será menor, de manera que el alargamiento de la probeta subsize será menor que el alargamiento de la probeta estándar.

Lo expuesto en los párrafos anteriores se representa de la siguiente manera:

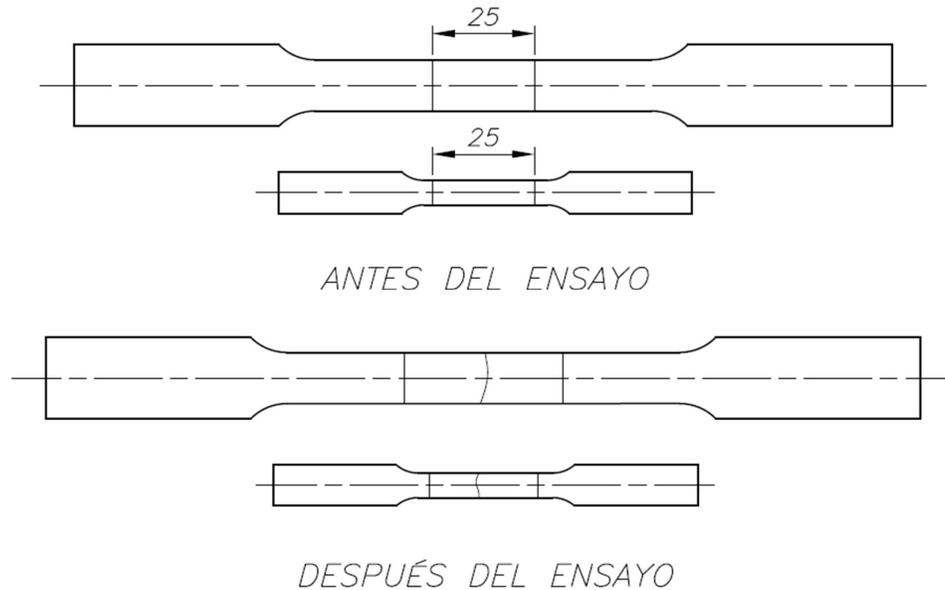


Figura 37: Comparación de probetas antes y después del ensayo de tracción

3.4.5.3.2. Repetibilidad

En el estudio 4 se comprueba que las probetas subsize presentan menor repetibilidad respecto a las probetas estándar en las propiedades de esfuerzo a la fluencia y esfuerzo a la tracción, lo cual se puede observar en la tabla 47.

Las probetas subsize presentan mayor dispersión, pues los coeficientes de variación son más altos. Esta dispersión, probablemente se debe al efecto combinado del material (la orientación y el contenido relativo de inclusión definido como la razón de la fracción área de inclusión con respecto al área total de la probeta) y alguna deformación no homogénea o mediante el proceso de endurecimiento y posterior recuperación en las zonas de mayor

deformación de las probetas ensayadas [31, pp. 12]. En las probetas subsize el contenido relativo de inclusión tiene una mayor influencia ya que al tener menor área el efecto de la inclusión es mayor.



3.4.5.4. Otros comentarios:

3.4.5.4.1. Diferencia en la repetibilidad del esfuerzo y la repetibilidad de la elongación:

La norma ASTM E8/E8M – 16a [8] menciona en el punto X1.6.2 que las mediciones realizadas para la ductilidad presentan menos reproducibilidad y repetibilidad que las mediciones de esfuerzos, lo cual es consistente con lo desarrollado durante el presente estudio; se verifica lo mencionado por la norma.

3.4.5.4.2. Repetibilidad:

La norma ASTM E8/E8M – 16a [8] en el punto X2.2 menciona que el error de medición relativo debería ser menor o igual a 1%. Idealmente, este error debería incluir no sólo la resolución del dispositivo, si no también la repetitibilidad y reproducibilidad. Sin embargo, en el presente estudio se ha demostrado que aún siguiendo las normas del ensayo de tracción (ASTM A370 - 19, ASTM E8/E8M-16a e ISO 6892-1:2016) se tienen valores mucho mayores a 1%.

Además, otros factores que contribuyen a la variación de los resultados del ensayo de tracción son la verificación de la celda de carga, alineamiento de la probeta, seteo a cero de los instrumentos de adquisición de data, entre otros.

3.4.5.4.3. Sensibilidad a la velocidad de deformación:

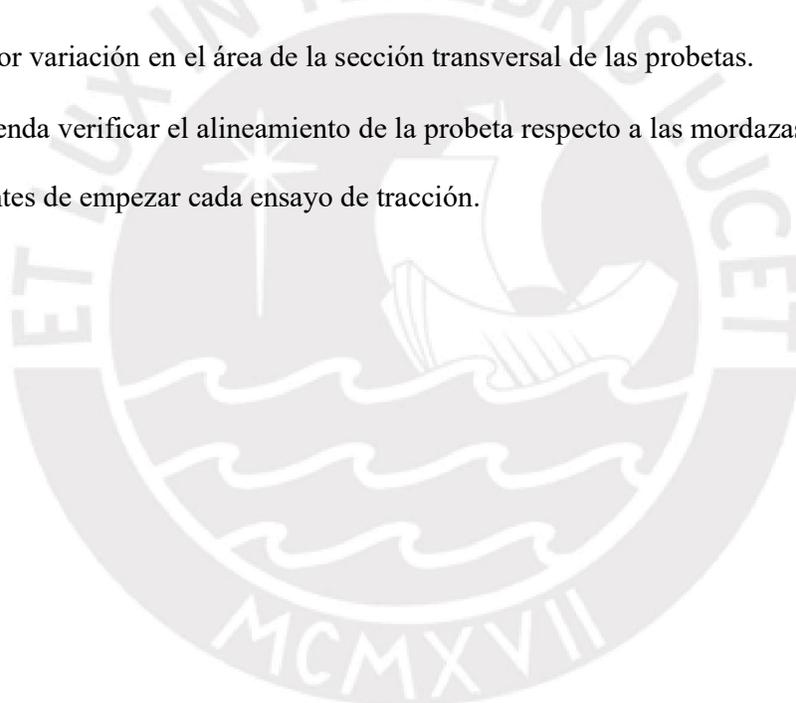
La norma ASTM E8/E8M – 16a [8] indica en el punto X4.1 que muchos materiales son sensibles a la velocidad de deformación, refiriéndose a que el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de tracción son función de la velocidad de deformación, haciendo incapié que pueden variar en más de 10% al ensayar las probetas a la más alta y a la más baja velocidad de deformación. En el presente estudio se tiene una variación de 7% al realizar los ensayos con las velocidades propuestas, por lo que el material estudiado es medianamente sensible a la velocidad de deformación. Asimismo, se recomienda que las velocidades de deformación sean similares cuando se ensaye un material sensible a la velocidad de deformación.

CONCLUSIONES

- Al realizar la caracterización del material ensayado (metalografía, análisis químico y tracción), se verifica que es un acero estructural de bajo carbono laminado en caliente, el cual cumple con la composición química y propiedades mecánicas de la norma ASTM A36/A36M – 19, así como también la microestructura analizada es compatible con la de un acero de bajo carbono.
- Se concluye que los esfuerzos de fluencia y de tracción aumentan a medida que disminuye la temperatura de ensayo. Para el alargamiento, al aumentar la temperatura de ensayo se incrementa el alargamiento. Las variaciones máximas obtenidas fueron de 7% en el esfuerzo de fluencia, 3% en el esfuerzo último a la tracción y 7% en el alargamiento.
- Se concluye que los esfuerzos de fluencia y de tracción aumentan al incrementar la velocidad de ensayo. Para el alargamiento, al disminuir la velocidad de ensayo aumenta el alargamiento. Las variaciones máximas obtenidas fueron de 5% en el esfuerzo de fluencia, 2% en el esfuerzo último a la tracción y 14% en el alargamiento.
- El alargamiento disminuye al usar probetas subsize, teniendo una diferencia en el alargamiento de 9%, así como el error relativo tomando como referencia el alargamiento de la probeta estándar es de 21%.
- No es necesario un rango más estrecho de manipulación de los parámetros de ensayo debido a que los resultados no presentan grandes cambios. Sin embargo, cabe resaltar que el parámetro más influyente es la temperatura de ensayo baja ya que presenta los mayores esfuerzos y tiene la mayor variación respecto a los demás ensayos. Del mismo modo, para el caso del alargamiento el parámetro más influyente es la velocidad de ensayo baja.

RECOMENDACIONES

- Se realizó en promedio 3 a 4 repeticiones por cada combinación de parámetros, sin embargo, se tuvo demasiada dispersión en los resultados de las probetas subsize por lo que se recomienda realizar un número mayor de repeticiones para estas a fin de garantizar mayor consistencia en los resultados.
- Se observó variación en el ancho de las probetas, lo cual introduce incertidumbre en el cálculo de los esfuerzos a pesar de estar dentro de lo permitido por las normas usadas en el presente estudio. Se recomienda usar menores tolerancias dimensionales de manera que se tenga menor variación en el área de la sección transversal de las probetas.
- Se recomienda verificar el alineamiento de la probeta respecto a las mordazas y el seteo de la carga antes de empezar cada ensayo de tracción.



BIBLIOGRAFÍA

[1] AMERICAN SOCIETY FOR METALS

2010 ASM Metals HandBook. Mechanical Testing and Evaluation, Volume 8. 10th Edition.

[2] AMERICAN SOCIETY FOR METALS

2009 ASM Metals HandBook. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloy, Volume 1. 10th Edition.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2017 A 6/A 6M – 17a. Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling.

[4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2000 A 36/A 36M – 19. Standard Specification for Carbon Structural Steel.

[5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2017 A 370 – 19. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

[6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2011 E 3 – 11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens

[7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2015 E 6 – 15e1. Standard Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing.

[8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2016 E 8/E 8M – 16a. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

[9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2011 E 45 – 13. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.

[10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2015 E407 – 07(2015) e1. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

[11] CALLISTER, William

2015 Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Barcelona. Ediciones Reverté S.A.

[12] CENDÓN, ATIENZA y ELICES

2010 Influencia de diferentes variables del ensayo de tracción en la deformación de rotura. Departamento de Ciencia de Materiales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

[13] DIETER, George

1961 Metalurgia Mecánica. Segunda Edición. New York. Mc Graw - Hill

[14] FERNÁNDEZ, Ignacio

2015 Estudio del comportamiento en rotura de un material metálico dúctil. Aspectos experimentales y numéricos. Tesis de Maestría. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

[15] FOLCH, Luis y FERNÁNDEZ, Ariel

2002 Caracterización numérico-experimental de las propiedades mecánicas del acero estructural en un rango amplio de temperaturas. Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Investigación Científica y Tecnológica DICYT. Santiago, Chile.

[16] GÁLVEZ, F.; ATIENZA J. M.; RUIZ, J.; ELICES, M.

2001 Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de alambres de acero trefilados. Anales de mecánica de la fractura, Vol. 18, (2001). Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. de Ciencia de Materiales. Madrid.

- [17] GÁLVEZ, Francisco; PÉREZ, María Jesús; ERICE, Borja; SÁNCHEZ GALVEZ, Vicente
2011 Efecto de la temperatura, la velocidad de deformación y la microestructura en el comportamiento mecánico de intermetálicos y-TiAl. Departamento de Ciencia de Materiales, CISDEM, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- [18] HANWU D, LIMIN W, KE L, LIDONG W, BIN J, FUSHENG P
2016 Comportamientos de microestructura y deformación de dos aleaciones Mg-Li con doble fase con un incremento de la velocidad de tracción. Chongqing University, China.
- [19] INTERNATIONAL STANDARD
2016 ISO 6892-1:2016. Metallic materials - Tensile testing.
- [20] JOHNSON, R. Gordon
2010 Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Air Force Armament Laboratory, Eglin Air Force Base, Florida, U.S.A.
- [21] L. Cui, H. Su, J. Yu, T. Jin, X. Sun
2017 Dependencia de la temperatura de las propiedades de tracción y comportamientos de deformación de la superaleación a base de níquel M951G. Instituto de Investigación Metálica, Academia China de Ciencias, Shenyang 110016, China.
- [22] LICHTENFELD, A.; MATAYA, M.; VAN TYNE, C
2006 Effect of Strain Rate on Stress-Strain Behavior of Alloy 309 and 304L Austenitic Stainless Steel. Metallurgical and materials transactions a, Vol. 37a, 2006, U.S.
- [23] MA, J.; LI, W.; ZHANG, X.; HAIBO, K.; SHAO, J.; GENG, P.
2001 Tensile properties and temperature-dependent yield strength prediction of GH4033 wrought superalloy. Materials Science & Engineering A, Vol. 676, 2016, China.

[24] MANSILLA, A.; REGIDOR, A.; GARCÍA, D.; NEGRO, A.

2001 Ensayo dinámico de tracción para la determinación de la curva Esfuerzo-Deformación a distintas velocidades de deformación. Revista de metalurgia, Vol. 37, 2001, Madrid.

[25] NAGARAJARAO, LOHRMANN, TALL.

1966 Effect of strain rate on the yield stress of structural steel, ASTM Journal of Materials, Vol. 1, No. 1. Lehigh University. Bethlehem, Pennsylvania.

[26] NAVARRO, Andrés

2013 Determinación de los parámetros característicos del comportamiento tenso-deformacional de aceros inoxidables ferríticos conformados en frío. Tesina de especialidad. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, Enginyeria de la Construcció.

[27] PU, E.; ZHENG, W.; SONG, Z.; FENG, Y.; DONG, H.

2017 Effects of temperature and strain rate on tensile deformation behavior of superalloy UNS N10276. Materials Science & Engineering A, Vol. 699, 2017, China.

[28] RODRÍGUEZ, ARTIGAS, GÓMEZ, MONSALVE

2001 Sensibilidad a la velocidad de deformación de aceros laminados en caliente. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería. Universidad de Santiago de Chile.

[29] RUND, Martin; PROCHÁZKA, Radek; KONOPÍK, Pavel; DŽUGAN, Jan; FOLGAR, Hugo

2015 Investigación de la influencia de la geometría de la probeta en los resultados de la prueba de tracción para diferentes tasas de deformación. Primera Conferencia Internacional sobre Integridad Estructural. Prumyslova 995, Dobrany 33441, República Checa.

[30] SULAMET-ARIOBIMO, R.; SOEDARSONO, J.; SUKARNOTO, T.; RUSTANDI, A.; MUJALIS, Y.; PRAYITNO, D.

2016 Tensile properties analysis of AA1100 aluminium and SS400 steel using different JIS tensile standard specimen. Journal of Applied Research and Technology 14, 2016.

[31] TERÁN, J.; GONZÁLEZ, L.; MARTÍNEZ, M.

2007 Efecto del tamaño de probeta y orientación en la resistencia a la tracción y la tenacidad a la fractura. Revista de metalurgia, Vol. 43, 2007, Madrid.



