

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316L DEFORMADO A TEMPERATURAS CRIOGÉNICAS”

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Chumpitaz C., David R.
Para optar al Título de
Ingeniero Metalúrgico

Caracas, 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316L DEFORMADO A TEMPERATURAS CRIOGÉNICAS”

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Eli Saúl Puchi C.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Chumpitaz C., David R.
Para optar al Título de
Ingeniero Metalúrgico

Caracas, 2005

ACTA

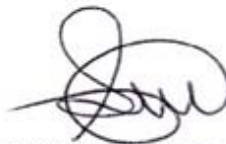
Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

“Estudio de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L deformado a temperaturas criogénicas.”

Presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. David R. Chumpitaz C., dejan constancia de lo siguiente.

Hemos leído el trabajo y participado en su discusión encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requisitos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

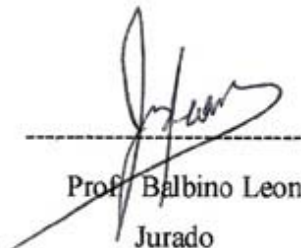
En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los catorce días del mes de Noviembre del 2005.



Por: Prof. Eli Saul Puchi
Tutor



Prof. Freddy Fraudita
Jurado



Prof. Balbino Leon
Jurado

DEDICATORIA

A Dios.

A la memoria de mi Abuelo.

A mi Familia, a quienes debo todo en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mis padres y demás familiares, por ser mi roca fuerte y mi refugio.

A Delia, por ayudarme a alcanzar mis sueños.

A Yuyo, el Morey y mi Luchi, por su valiosa amistad.

Al gremio de profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Al Ing. Engels Ochoa, por su ayuda incondicional y apoyo durante la realización de este trabajo, en calidad de amigo.

Al Prof. Crisanto Villalobos y José La Barbera por su orientación, ayuda y confianza durante la realización de este trabajo, en calidad de amigos.

Al Prof. Eli Saul Puchi Cabrera, tutor académico de la Universidad Central de Venezuela, quien a contribuido de forma directa en la realización de este trabajo.

Al Dr. Jose Maria Cabrera, por su apoyo y colaboración prestada durante la realización de la parte experimental de este trabajo.

Al Ing. Nayar Lugo, por su ayuda y apoyo.

A la Ing. y amiga Yelitza Rodríguez por recibirme en su hogar durante mi estadía en España.

A la Ing. Iris López y a Víctor, por hacerme sentir como en casa, durante mi viaje.

A los Tigres de Carayaca.

RESUMEN

David R. Chumpitaz C.

“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316L DEFORMADO A TEMPERATURAS CRIOGÉNICAS”

**Tutor Académico: Prof. Eli Saúl Puchi Cabrera. Tesis. Caracas, U. C. V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Año 2005, N° pág. 97**

**Palabras Claves: tracción, deformación en frío, bajas temperaturas,
acero inoxidable 316L.**

Resumen:

En este trabajo se plantea la realización de ensayos de tracción a bajas temperaturas de un acero inoxidable AISI 316L, con la finalidad de estudiar el comportamiento mecánico de esta aleación bajo condiciones de deformación a velocidad de cabezal constante, desde temperatura ambiente hasta temperaturas criogénicas y de ser posible realizar simultáneamente un análisis constitutivo del material para tales condiciones.

Para ello se emplearon tres diferentes velocidades de desplazamiento constante del cabezal (1, 10 y 100 mm/min) y siete temperaturas de ensayo (25, 0, -10, -30, -50, -70 y -100°C, respectivamente). Seguidamente por medio de Microscopia Electrónica de Barrido, se analizaron las superficies de fractura representativas para las tres velocidades del cabezal y diferentes temperaturas, con la finalidad de determinar el mecanismo de falla del material para las condiciones de ensayo.

En el estudio se observó que la velocidad tiene un papel importante en el comportamiento plástico del material, este comportamiento es altamente influenciado por la temperatura de ensayo ya que ambos limitan la deformación plástica. Se observó la presencia de dos comportamientos al disminuir la temperatura de ensayo:

Primero, hay un aumento de la ductilidad del material a medida que se incrementa la velocidad del cabezal y segundo, hay una disminución en la ductilidad al disminuir la velocidad de ensayo.

El estudio fractográfico, permitió observar que hay evidencia de un comportamiento dúctil del material para todas las condiciones de ensayo. Sin embargo, la cantidad y tamaño de microhoyuelos se ve afectada por la velocidad y temperatura de ensayo.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1 GENERALIDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316L.....	2
1.1.1 Aceros Inoxidables.....	2
1.1.2 Clasificación de los Aceros Inoxidables.....	2
1.1.3 Aceros Inoxidables Austeníticos.....	2
1.1.4 Acero Inoxidable Austenítico AISI 316L.....	10
1.1.5 Aceros para usos a bajas temperaturas.....	11
1.2 ENSAYOS DE TRACCION.....	15
1.2.1 Ensayos de Tracción.....	15
1.2.2 Características Generales.....	16
1.2.3 Efecto de la temperatura sobre las propiedades de tracción.....	24
1.2.4 Efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de tracción.....	27
1.2.5 Ensayos de tracción a bajas temperaturas.....	28
1.2.6 Comportamiento de los aceros a bajas temperaturas.....	35
1.3 ANTECEDENTES.....	38
CAPITULO II.....	41
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	41
2.1 ORGANIGRAMA DE TRABAJO.....	41
2.1.1 Obtención del material.....	42
2.1.2 Mecanizado y Pulido.....	42
2.1.3 Ensayos de Tracción.....	43
2.1.4 Estudio Fractográfico.....	45
2.2 DESCRIPCION DE EQUIPOS.....	47
2.2.1 Torno.....	47
2.2.2 Maquina de Tracción.....	47
2.2.3 Cámara Ambiental.....	48
2.2.4 Cortadora de disco abrasivo.....	49
2.2.5 Microscopio Electrónico de Barrido.....	50
CAPITULO III.....	51
3. RESULTADOS Y ANALISIS.....	51

3.1 Ensayos de Tracción.....	51
3.2 Estudio Fractográfico.....	64
CAPITULO IV.....	78
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
4.1 CONCLUSIONES.....	78
4.2 RECOMENDACIONES.....	79
CAPITULO V.....	79
5. BIBLIOGRAFIA.....	80
5.1 BIBLIOGRAFIA.....	80

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1 Influencia del Níquel en la fase gamma de un acero con 18% de Cromo...	3
Figura 1.2 Comparación de esfuerzos a tracción, entre los esfuerzos de fluencia y el esfuerzo máximo, y el intervalo de endurecimiento por deformación para una acero inoxidable austenítico S30100, acero inoxidable ferrítico S43000, y un acero al carbono G10080.....	4
Figura 1.3 Resultados de ensayos de flexión rotativa de un acero 304 trabajado en frío.....	5
Figura 1.4 Esfuerzo de Fluencia versus Temperatura (4 a 300 K) para varios metales que han sido estudiados para aplicaciones criogénicas.....	7
Figura 1.5 Efecto del trabajo en frío en las propiedades de los aceros inoxidables 304 y 304L.....	8
Figura 1.6 Efecto de la temperatura en el calor específico de los aceros inoxidables 304 y 304L.....	9
Figura 1.7 Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de los aceros inoxidables 304 y 304L.....	9
Figura 1.8 Curva Fuerza-Deformación.....	16
Figura 1.9 Grafica de esfuerzo-deformación para un acero dúctil.....	16
Figura 1.10 Grafica de esfuerzo-deformación para un acero frágil.....	17
Figura 1.11 diagrama de esfuerzo-deformación.....	17
Figura 1.12 a) Geometría de la región de estricción localizada. b) tensiones que actúan sobre un elemento en el punto O.....	20
Figura 1.13 Relación entre el diagrama esfuerzo-deformación real, y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril.....	24
Figura 1.14 Variación de las curvas esfuerzo-deformación de un acero suave con la temperatura.....	25
Figura 1.15 Variación de las propiedades de tracción del acero con la temperatura.....	25
Figura 1.16 Efecto de la temperatura en el limite de elasticidad de los metales bcc (Ta, W, Mo y Fe) y fcc (Ni).....	26
Figura 1.17 Efecto de la temperatura sobre la estricción del Ta, W, Mo, Fe y Ni....	27
Figura 1.18 Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la tracción del cobre en ensayos a diversas temperaturas.....	28
Figura 1.19 Máquina universal de ensayos mecánicos, Instron 5585.....	29

Figura 1.20 Cámara ambiental, Eurotherm MTS Systems Corporation, modelo 651.06E-03.....	30
Figura 1.21 Diagrama esfuerzo-deformación a bajas temperaturas para un acero inoxidable 304.....	31
Figura 1.22 Efecto de la temperatura en la resistencia de varios materiales.....	31
Figura 1.23 Efecto de la temperatura en la ductilidad de varios materiales.....	32
Figura 1.24 Probeta para Ensayos de Tracción Uniaxial según Norma ASTM A370.....	35

CAPITULO II

Figura 2.1 Organigrama de Trabajo.....	41
Figura 2.2 Probeta para Ensayos de Tracción Uniaxial según Norma ASTM A370.....	42
Figura 2.3 Torno Myford modelo ML7-R.....	43
Figura 2.4 Maquina universal de ensayos mecánicos, Instron 5585, con el montaje de la cámara ambiental, Eurotherm MTS Systems Corporation 651.06E-03.....	47
Figura 2.5 Condiciones de ensayo, tres velocidades de cabezal móvil constantes y siete temperaturas diferentes.....	48
Figura 2.6 Montaje de las probetas dentro de la cámara ambiental Eurotherm MTS Systems Corporation 651.06E-03.....	49
Figura 2.7 Cortadora de disco abrasivo, marca BUEHLER, modelo ABRASIMET 2.....	50

CAPITULO III

Figura 3.1 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (1mm/min).....	52
Figura 3.2 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (10mm/min).....	53
Figura 3.3 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (100mm/min).....	54
Figura 3.4 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (3mm/min). ⁽²⁵⁾	55
Figura 3.5 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (25°C).....	56
Figura 3.6 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (0°C).....	56

Figura 3.7 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-10°C).....	57
Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-30°C).....	58
Figura 3.9 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-50°C).....	58
Figura 3.10 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-70°C).....	59
Figura 3.11 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-100°C).....	59
Figura 3.12 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia.....	61
Figura 3.13. Efecto de la velocidad de cabezal móvil sobre el esfuerzo de fluencia..	61
Figura 3.14 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo máximo.....	62
Figura 3.15 Efecto de la velocidad de cabezal móvil sobre el esfuerzo máximo.....	63
Figura 3.16 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	64
Figura 3.17 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	65
Figura 3.18 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	66
Figura 3.19 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	66
Figura 3.20 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	67
Figura 3.21 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	68
Figura 3.22 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	68
Figura 3.23 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	69
Figura 3.24 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	69
Figura 3.25 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	70
Figura 3.26 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	71
Figura 3.27 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	71
Figura 3.28 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	72

Figura 3.29 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	72
Figura 3.30 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	73
Figura 3.31 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	74
Figura 3.32 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	74
Figura 3.33 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	75
Figura 3.34 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.....	75
Figura 3.35 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.....	76
Figura 3.36 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.....	76

INDICE DE TABLAS

CAPITULO I

Tabla 1.1 Propiedades a tracción de algunos aceros inoxidables austeníticos.....	5
Tabla 1.2 Coeficientes de expansión térmica de algunos aceros inoxidables a diferentes temperaturas.....	10
Tabla 1.3 Composición química del acero inoxidable 316L.....	11
Tabla 1.4 Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316L.....	11

CAPITULO III

Tabla 3.1 Valores del esfuerzo de fluencia y esfuerzo a carga máxima para diferentes temperaturas y diferentes velocidades de cabezal móvil constante.....	60
---	----

INTRODUCCION

Es muy conocido el efecto que tienen sobre los materiales las condiciones de operación en los elementos estructurales utilizados en la industria. Tal es el caso de los componentes sometidos a esfuerzos y temperaturas variables. La variación de cargas aplicadas sobre estos elementos puede ser repetitiva o aleatoria. En el caso de los cambios de temperaturas también se pueden presentar estas variaciones, así como aplicaciones constantes de bajas temperaturas o altas temperaturas.

El campo de la criogenia avanzó durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se observaron fallas de cascos metálicos de barcos por fractura frágil y los científicos descubrieron que algunos metales enfriados a baja temperatura mostraban mayor resistencia al desgaste. Esto, ha demostrado que un material que ha pasado exitosamente un control de calidad a temperatura ambiente establecido según norma, puede llegar a ser inaceptable cuando su servicio es requerido en ambientes donde la temperatura desciende drásticamente. Por esto, surge la necesidad de evaluar las propiedades mecánicas de los materiales deformados a temperaturas criogénicas.

Entre los ensayos mecánicos destructivos más comunes a los que son sometidos los materiales se encuentra el de tracción uniaxial. Este tipo de ensayo se puede realizar en una máquina universal de ensayos mecánicos, que se encargará de ir aplicando las cargas deseadas a la probeta. Adicionalmente a la máquina de ensayos, se puede disponer de dispositivos especialmente diseñados para modificar las condiciones ambientales a las que pudiera estar sometida la probeta, como por ejemplo la temperatura.

La intención de este trabajo especial de grado es estudiar las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L deformado a temperaturas criogénicas, realizando ensayos de tracción uniaxial en el material antes mencionado, a diferentes temperaturas, en condiciones de velocidad de cabezal móvil constante a distintas velocidades de desplazamiento. Permitiendo así, establecer el comportamiento mecánico y tipo de falla que se presente.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO

1.1 GENERALIDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 316L.

1.1.1 Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidable son aleaciones con base de hierro que contienen por lo menos un 10,5% de Cr. Algunos aceros inoxidable contienen más del 30% de Cr y menos del 50% de Fe.

Los aceros inoxidable consiguen sus características de inoxidable gracias a la presencia de una fina, densa (no porosa) continua, insoluble, adherente, tenaz, auto regenerante e impermeable capa de óxido hidratado de cromo en la superficie de estos aceros que impide, una vez formada esta, el contacto del acero con el medio oxidante.⁽¹⁾

1.1.2 Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidable pueden ser divididos en cinco grupos familiares. Cuatro de estos son basados en las características microestructurales de la aleación en las familias: ferrítica, martensítica, austenítica y duplex (austenítico+ferrítico). La quinta familia son las de aleaciones endurecidas por precipitación.⁽²⁾

1.1.3 Aceros Inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos contienen un mínimo de 8% de Ni con un 18% de Cr. Estas y otras combinaciones constituyen la familia de los aceros inoxidable austeníticos o también llamados al Cromo-Níquel. La Figura 1.1 muestra una serie de diagramas de equilibrio de Fe-C con 18% de Cr y contenidos crecientes de Ni, donde se puede apreciar la capacidad del níquel para expandir y disminuir el campo austenítico.

Para aplicaciones con corrosión es necesario el control del contenido de carbono por debajo de 0,08% (304 y 316). Cuando estos aceros se sueldan se deben tomar precauciones adicionales y frecuentemente se especifican valores de carbono inferiores a 0,03% (304L y 316L), "L" es la abreviatura de bajo carbono (low carbon) en ingles.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una estructura cúbica centrada en la cara (FCC). La inherente plasticidad de la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de la austenita transmite a estos aceros su tenacidad, ductilidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto, incluso a temperaturas criogénicas, y pueden ser endurecidos sustancialmente por trabajo en frío (Figura 1.2). El grado de endurecimiento por deformación va a depender del contenido de la aleación. Aceros inoxidables austeníticos con bajo contenido de elementos aleantes pueden volverse magnéticos debido a la transformación de austenita a martensita si es muy deformado durante el trabajo en frío e incluso durante el mecanizado.⁽²⁾

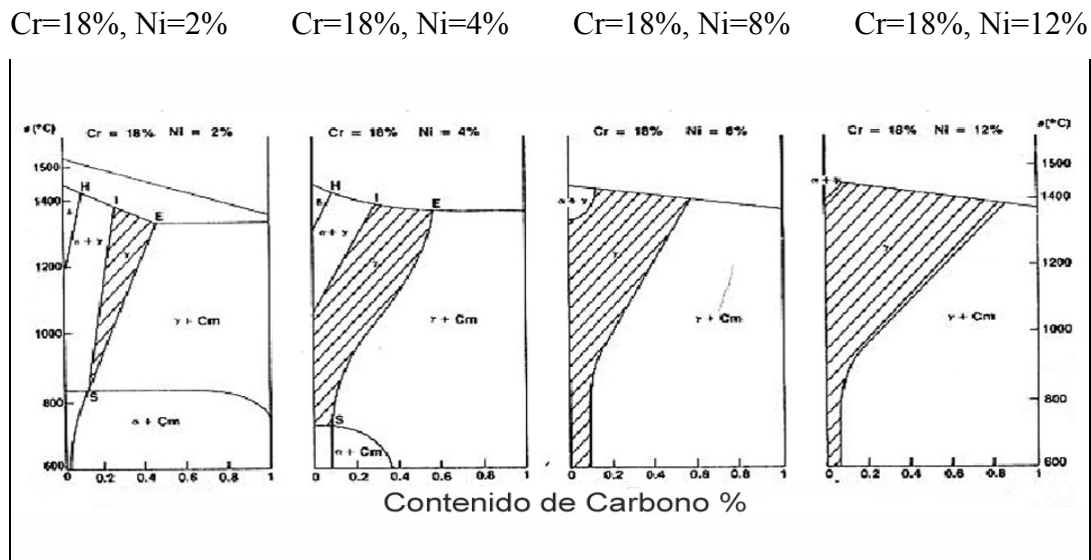


Figura 1.1 Influencia del Níquel en la fase gamma de un acero con 18% de Cromo.

La serie 300 de los aceros inoxidables ofrece una buena combinación de tenacidad y soldabilidad para servicios a bajas temperaturas. Como familia, la serie 300 de aceros inoxidables puede identificarse por que no son magnéticos. Cuando existe un

temple sus propiedades de resistencia son adecuadas para equipos robustos pero inadecuados para estructuras livianas. Para aplicaciones aeroespaciales los fabricantes pueden tomar ventaja de las características de endurecimiento por deformación de las aleaciones y usarlas en condiciones de extremo trabajo en frío. De la serie 300 de los aceros inoxidable, los tipos 304, 304L, 310, y 347 son los más empleados para condiciones de temperaturas criogénicas.⁽³⁾

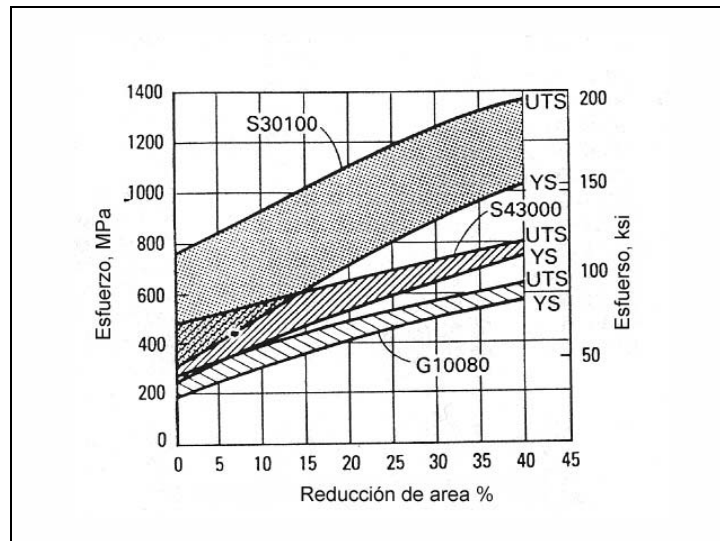


Figura 1.2 Comparación de esfuerzos a tracción, entre los esfuerzos de fluencia y el esfuerzo máximo, y el intervalo de endurecimiento por deformación para una acero inoxidable austenítico S30100, acero inoxidable ferrítico S43000, y un acero al carbono G10080.⁽²⁾

Para la realización de un estudio completo de las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico se debe considerar los efectos de las temperaturas criogénicas en las propiedades de tracción. En la tabla 1.1 podemos ver como afecta la temperatura las propiedades de tracción de los aceros anteriormente nombrados, se muestran las propiedades de tracción a temperatura ambiente 75°F (24°C), -320°F (-196°C) y a -425°F (-254°C). También es posible apreciar que la ductilidad (reducción de área y elongación) se mantiene a lo largo del intervalo de temperaturas, y que la resistencia a la tracción y a la fluencia, son inversamente proporcionales a la disminución de la temperatura.

Tabla 1.1 Propiedades a tracción de algunos aceros inoxidable austeníticos.⁽³⁾

Tipo AISI	Temperatura de ensayo, F	Esfuerzo de Fluencia (0.2%), psi	Resistencia a la tracción, psi	Elongación %	Reducción de área, %
304	75	33,000	85,000	60	70
304	-320	57,100	205,500	43	45
304	-425	63,700	244,500	48	43
304L	75	28,000	85,000	60	60
304L	-320	35,000	194,500	42	50
304L	-425	33,900	220,000	41	57
310	75	45,000	95,000	60	65
310	-320	84,900	157,500	54	54
310	-425	115,500	177,500	56	61
347	75	35,000	90,000	50	60
347	-320	41,200	186,000	40	32
347	-425	45,500	210,500	41	50

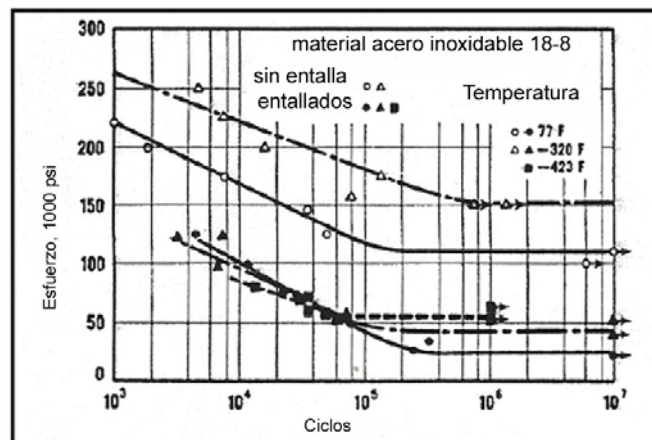


Figura 1.3 Resultados de ensayos de flexión rotativa de un acero 304 trabajado en frío.⁽³⁾

De igual manera podemos decir que los aceros inoxidable muestran una gran ductilidad y una gran tenacidad a temperaturas criogénicas, así como una buena resistencia a la fatiga, aunque realmente existe relativamente poca información en cuanto a la resistencia a fatiga de aceros inoxidable austeníticos a temperaturas criogénicas, la información disponible indica que el límite de resistencia a la fatiga se incrementa a medida que la temperatura disminuye (Figura 1.3).⁽³⁾

Este incremento en el límite de resistencia a la fatiga con la disminución de la temperatura es consistente el aumento de la resistencia a la tracción, y muchos estudiosos creen que ambas están relacionadas entre sí.⁽³⁾

Las temperaturas criogénicas causan que muchas aleaciones estructurales se transformen en frágiles, lo que es una condición inaceptable en muchas aplicaciones estructurales. Por esta razón las estructuras construidas para ser utilizadas con fines estructurales son fabricadas con aleaciones que mantengan alguna ductilidad a estas temperaturas de servicio.⁽⁴⁾

En algunas aplicaciones criogénicas es deseable tener aceros con alta resistencia mecánica que puedan ser obtenidas con los aceros inoxidable austeníticos recocidos. Al bajar la temperatura por debajo de la ambiente, algunas aleaciones criogénicas se endurecen apreciablemente. Al menos de que otra propiedad degrade y compense este efecto, tal endurecimiento beneficia mucho al permitir reducir el peso y el grosor de miembros estructurales que son diseñados para soportar cargas. La Figura 1.4 muestra este efecto endurecedor para algunos sistemas de aleaciones estudiados para aplicaciones criogénicas.

Como se observa en la Figura 1.4 los aceros inoxidable austeníticos (Serie 300) ofrecen una resistencia intermedia a temperatura ambiente, pero que va aumentando gradualmente con la disminución de la temperatura. Como también se observa este aumento en la resistencia es función directa del contenido de nitrógeno en la aleación.

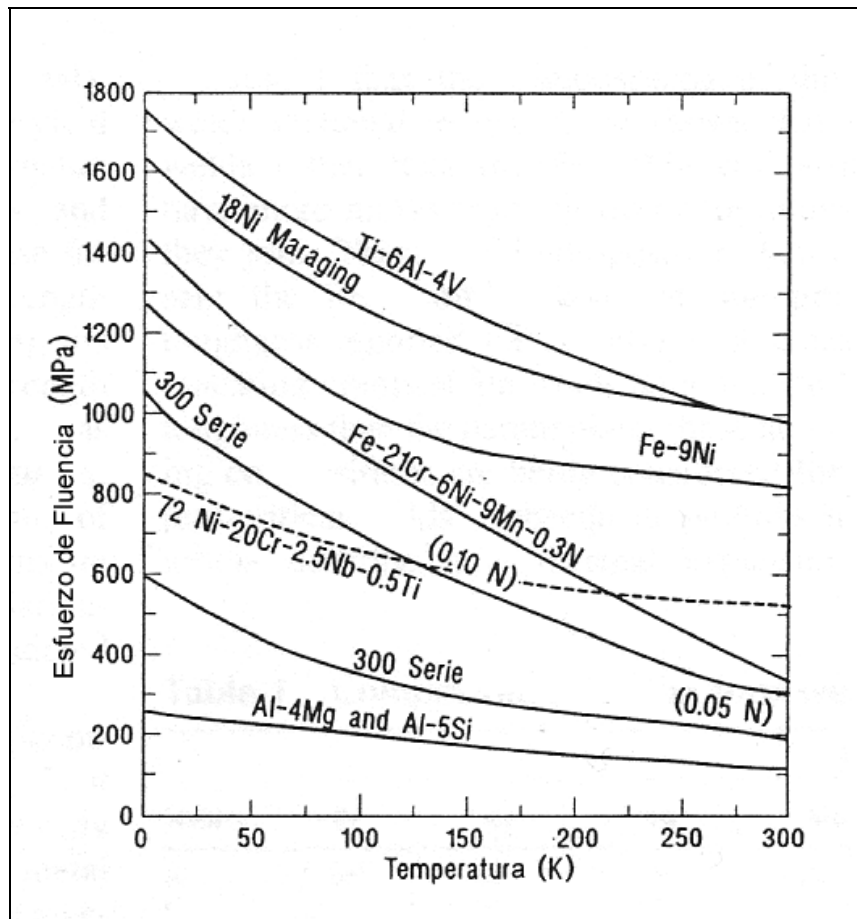


Figura 1.4 Esfuerzo de Fluencia versus Temperatura (4 a 300 K) para varios metales que han sido estudiados para aplicaciones criogénicas.⁽⁴⁾

La alta resistencia mecánica puede ser alcanzada en los aceros inoxidables austeníticos únicamente por trabajo en frío. En la Figura 1.5 podemos apreciar el efecto del trabajo en frío sobre los aceros 304 y 304L. El trabajo en frío logra un descenso leve en la tenacidad debido a la transformación de la austenita en martensita que ocurre a las temperaturas criogénicas.⁽³⁾

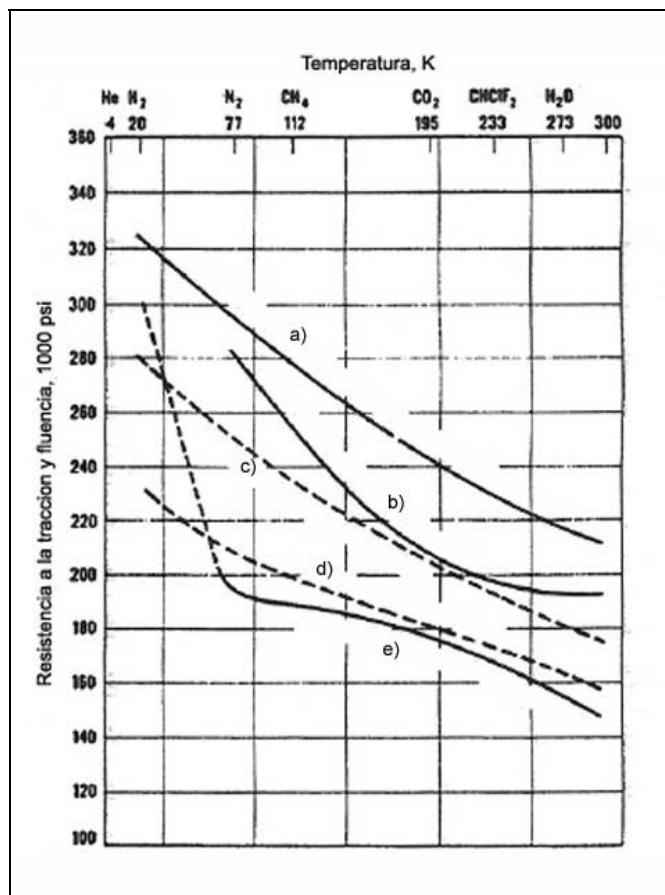


Figura 1.5 Efecto del trabajo en frío en las propiedades de los aceros inoxidables 304 y 304L. a) Resistencia a la tracción, trefilado en frío, 210.000 psi (304). b) Resistencia a la tracción, laminado en frío, 50% (304). c) Resistencia a la tracción. Altamente endurecido. (304L). d) Resistencia a la fluencia. Altamente endurecido (304L). e) Resistencia a la fluencia. Trefilado en frío. 210.000 psi (304).

El conocimiento de algunas propiedades físicas de estos aceros como la densidad, expansión térmica, conductividad térmica y calor específico son muy importantes a la hora de realizar un diseño. La densidad se incrementa a medida que se disminuye la temperatura, excepto para los aceros 301, este incremento es lineal. Si se habla de la conductividad térmica y el calor específico, estos descienden con la disminución de la temperatura, se puede observar en la Figura 1.6 y la Figura 1.7 como se presenta este efecto sobre las propiedades de los aceros inoxidables austeníticos 304 y 304L

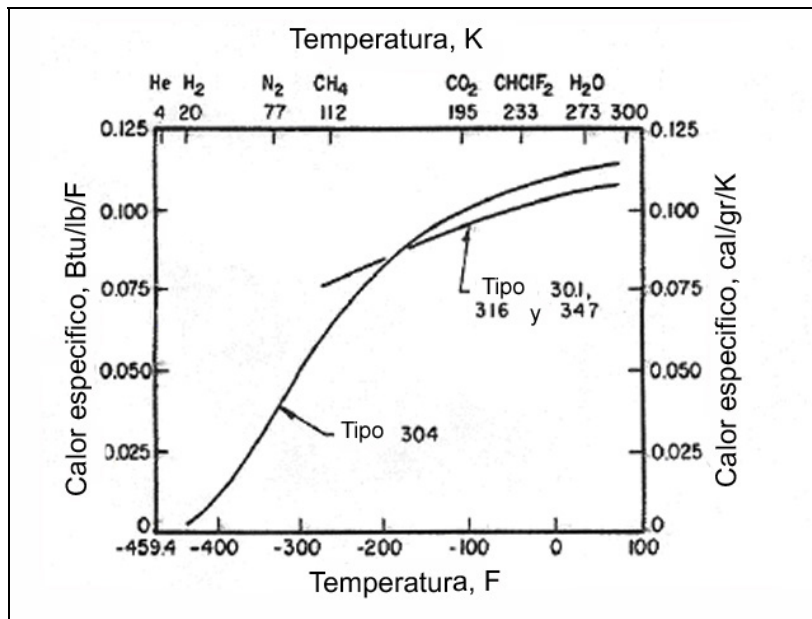


Figura 1.6 Efecto de la temperatura en el calor específico de los aceros inoxidables 304 y 304L.⁽³⁾

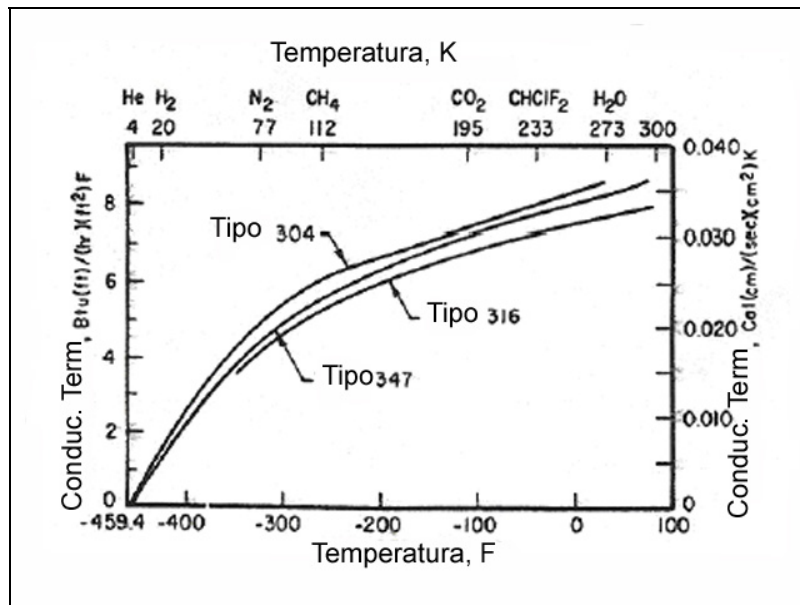


Figura 1.7 Efecto de la temperatura en la conductividad térmica de los aceros inoxidables 304 y 304L.⁽³⁾

La expansión térmica también es una propiedad importante en estructuras sometidas a temperaturas criogénicas, debido a los grandes esfuerzos a los que pueden estar sometidos debido a los cambios de temperatura (Tabla 1.2).⁽³⁾

Tabla 1.2 Coeficientes de expansión térmica de algunos aceros inoxidable a diferentes temperaturas.⁽³⁾

Tipo AISI	Coeficientes en micro-in/in/F			
	-300 F	-200 F	-100 F	0 F
	to 70 F	to 70 F	to 70 F	to 70 F
301	7.6	7.8	8.2	8.7
304	7.4	7.7	8.2	8.7
310	7.0	7.5	7.8	8.0
316	7.1	7.4	7.8	8.2
347	7.5	8.1	8.5	8.7

1.1.4 Acero Inoxidable Austenítico AISI 316L

Estos son aceros inoxidable austeníticos al cromo níquel molibdeno (Cr, Ni, Mo). Proviene específicamente del acero 304 con una disminución del contenido de carbono y con un aumento del contenido de Mo, son insensibles a la corrosión intermetalica en soldaduras y no necesitan tratamientos térmicos post-soldadura, además poseen un buen comportamiento ante la deformación en frío y permite alcanzar altos grados de pulimento, lo que lo hace muy popular para usos criogénicos, en general debido a que son fáciles de fabricar y soldar, no requieren tratamientos térmicos luego de su fabricación además de mostrar resistencias relativamente altas con excelente estabilidad y tenacidad a muy bajas temperaturas.

La composición química y las propiedades mecánicas de este acero se puede observar en la Tabla 1.3 y Tabla 1.4.⁽²⁾

Tabla 1.3 Composición química del acero inoxidable 316L.⁽²⁾

Aleación	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%P	%S	%Mo
316L	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0

Tabla 1.4 Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316L.⁽²⁾

Resistencia a la tracción	Esfuerzo de fluencia	% de reducción de área	Dureza (HB)
724 MPa	563 MPa	35	208

1.1.5 Aceros para usos a bajas temperaturas

En la actualidad gran cantidad de equipos y herramientas son requeridos para trabajar a temperaturas bajo cero, por lo que se necesita tomar en cuenta el comportamiento de metales a temperaturas por debajo de -150°C.

Un incremento en la resistencia a la tracción y a la fluencia a bajas temperaturas es muy característico de los metales en general. El Cobre, Níquel, Aluminio y las aleaciones austeníticas mantienen gran parte o toda su ductilidad y tenacidad a bajas temperaturas sin importar el incremento del esfuerzo.

En el caso de un acero dulce sin entalla, la elongación y la reducción de área es aceptable hasta los -130°C y luego disminuye drásticamente. Se consigue casi exclusivamente en los aceros ferríticos que con un descenso abrupto en el valor IZO-D ocurre a temperaturas cercanas a los cero grados centígrados. Para evitar la temperatura de transición en donde ocurre la fractura frágil se debe cumplir ⁽⁵⁾:

- Una disminución en el contenido de carbono, menos de 0,15% es deseable.
- Una reducción en la velocidad de deformación.
- Una reducción en la profundidad de la entalla.

- Un incremento en el radio de la entalla, 6mm mínimo.
- Un incremento en el contenido de níquel, 9%.
- Una reducción en el tamaño de grano.
- Un incremento en el contenido de manganeso; la relación Mn/C debe ser mayor 21.

Un desbaste de la superficie con un elemento de granulometría elevada (< 180) causa fragilización a -100°C debido a un endurecimiento superficial que es corregido por un temple a $650-700^{\circ}\text{C}$ por una hora.⁽⁵⁾ Este tratamiento superficial también provee protección del inicio de la fractura frágil de estructuras soldadas removiendo los esfuerzos residuales.

El acero al 2,25% de níquel es igualmente utilizado para tanques, recipientes a presión, tuberías para propano licuado y para otras aplicaciones con una temperatura mínima de trabajo de -60°C aceptada por la Norma ASTM A-300, tipo 2.⁽⁶⁾ Para trabajar a estas temperaturas el acero al 2,25% de níquel debe ser normalizado a 900°C y revenido después de la construcción a 635°C .

El acero al 3,5% níquel puede tener aplicaciones hasta la temperatura del etileno líquido (-103°C) por lo que es utilizado en todos aquellos elementos que tienen contacto con gas licuado, tales como propano, anhídrido carbónico, acetileno, etano y etileno, y en las plantas productoras de plástico.⁽⁶⁾ Sus excelentes propiedades a bajas temperaturas lo hacen ideal en tanques para el transporte de etileno líquido.

Las características de este acero se encuentran en la Norma ASTM A.203 tipo D y E. Un acero 4% Mn-Ni es apropiado para fundiciones que se usarán por debajo de los -196°C . Hay que ser cuidadosos de seleccionar láminas sin defectos superficiales y libres de entallas en el diseño y la fabricación.⁽⁷⁾

Después de algunas catástrofes causadas por la selección errónea del material usado a estas temperaturas, se recurrió al uso de formulas precisas que lograron

seleccionar materiales como el acero al 9% níquel para la fabricación de contenedores y tanques soldados.

Los estudios para el desarrollo de este material se iniciaron en La Compañía Internacional del Níquel (The International Nickel Company) en 1944 y ya desde 1952 se comenzó la fabricación de elementos y tanques para la producción y almacenamiento de oxígeno líquido.

Los aceros 9% níquel brindan una atractiva combinación de propiedades a un precio moderado.⁽³⁾ Su excelente tenacidad se debe a una estructura de granos finos de níquel-ferrita desprovista de redes de carburos fragilizantes que son convertidos en formas estables de austenita en la solución durante un temple a 570°C. Este temple es particularmente importante debido a las bajas temperaturas de transformación ferrita austenita.

Este acero se encuentra normalizado en la Norma ASTM A-353 en dos tipos A y B, donde prevé que su utilización debe ser con una doble normalización y revenido. Visto que en la industria estos elementos son de un gran tamaño y se hace imposible el tratamiento térmico, se realizaron diversos estudios los cuales arrojaron como resultado que se pueden utilizar estos materiales solo con los tratamientos de temple en agua y revenido.

Por sus excelentes propiedades y su bajo costo el acero 9% níquel está siendo empleado en las industrias a nivel mundial, como ejemplo se pueden nombrar los tanques de almacenamiento de oxígeno líquido en los Estados Unidos que llegan a tener un diámetro de 15m y 17.5m de altura con una capacidad de 500.000 galones; en Francia este acero es utilizado para la construcción de barcos que transportan metano líquido.

Para la soldadura de este tipo de acero es usado en general la soldadura eléctrica con electrodos especiales con una alta cantidad de níquel combinados con un 15% Cr, 10% Fe, 1 o 2% Nb o también un 3% de Ti en el lugar del Nb. También da excelente resultado la soldadura en argón con cordón desnudo.⁽³⁾

Los materiales empleados en la fabricación de tuberías tienen más importancia en la industria del gas natural que en la industria petrolera. Por ejemplo, el gas comprimido se traslada entre -25°C a -4°C haciendo que el crecimiento de grietas y la fragilización sean un problema severo en ambientes fríos. Alcanzar bajas temperaturas, lograr el control del tamaño de grano y tener bajos contenidos de azufre fueron los mayores problemas para el desarrollo de estos aceros desde que la parte económica tuvo que tomarse en cuenta.

Los aceros conformados en caliente presentan una buena oportunidad para disminuir tanto el peso como el costo y así reducir la relación costo-resistencia. A medida que la resistencia de los aceros de baja aleación y alta resistencia sube, la tenacidad usualmente baja.

Los aceros aleados con molibdeno, manganeso y columbio son usados para este tipo de tuberías, el molibdeno eleva la resistencia mecánica y la dureza.⁽⁵⁾ El porcentaje de carbono es reducido para hacer el columbio más soluble, y para mejorar la soldabilidad y la resistencia al impacto. Los aceros con pequeñas y grandes cantidades de columbio poseen una cinética de precipitación similar; una más alta resistencia es producida por una mayor cantidad de columbio. El columbio también genera endurecimiento, el cual es necesario para desarrollar una estructura ferrítica acicular. El manganeso, junto con el molibdeno ayuda a inhibir la transformación a ferrítica poligonal en el acero.⁽⁵⁾

Cuando el Azufre no puede mantenerse bajo, la adición de tierras raras controlará la forma de las inclusiones sulfatadas. Durante el trabajo en caliente, el refinamiento del grano mejora porque tiene un efecto sobre el anclaje del límite de grano. Este efecto hace posible la formación de una sub-estructura austenítica superior antes de la transformación, lo cual ayuda a asegurar la transformación a finos granos ferríticos aciculares.

Además de ser usados en tuberías, estos aceros pueden emplearse en automóviles, rieles, equipos pesados, industria de la construcción y aplicaciones en áreas en las cuales la característica clave es el bajo costo por unidad de resistencia.⁽⁵⁾

1.2 ENSAYOS DE TRACCION

1.2.1 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción consisten en sujetar un espécimen preparado, de diseño simple que puede ser fundido directamente o maquinado de tamaño y forma específico, por sus extremos y aplicar una carga uniaxial que se incrementa gradualmente, lo que resulta en un alargamiento del espécimen en estudio en una dirección paralela a la carga aplicada hasta que ocurra la falla.

Uno de los objetivos principales para realizar ensayos de tracción es determinar si existe o no conformidad de las propiedades con las especificaciones de diseño. Los datos obtenidos de los ensayos sirven como un indicador de la calidad de un producto en comparación con datos obtenidos previamente de otras fuentes. Esta data puede también ser utilizada para comparar un material dado con otros materiales, y en conjunto con otros factores puede permitir el reemplazo o mejoría del mismo.

Los fabricantes de productos metálicos usualmente utilizan este ensayo para controlar la eficiencia de los métodos de manufactura, y como una ayuda en el desarrollo de nuevos materiales.

Los ensayos de tracción son también utilizados para establecer las bases para la selección de valores en el diseño ingenieril. Cuando es realizado de manera correcta, el ensayo de tracción puede ser utilizado para evaluar propiedades mecánicas fundamentales para el diseño, sin embargo se debe hacer notar que las propiedades de tracción solamente no son suficientes para predecir el comportamiento bajo condiciones de servicio reales.⁽⁸⁾

1.2.2 Características generales

- La curva y sus significados

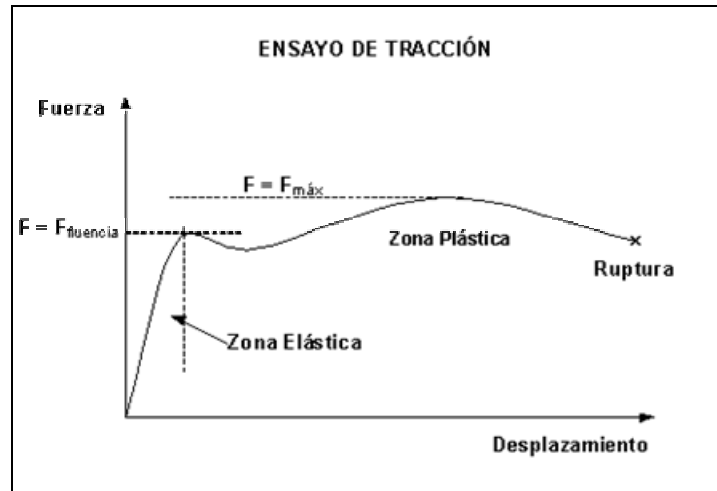


Figura 1.8 Curva Fuerza-Deformación.

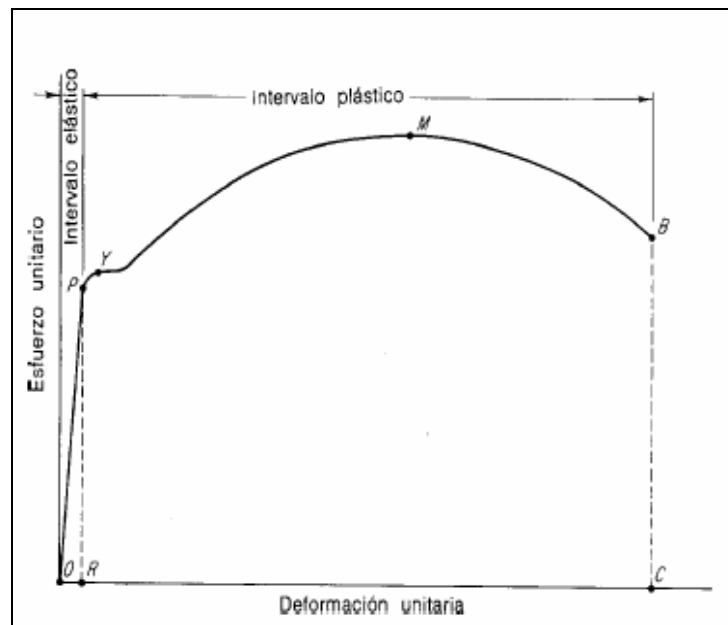


Figura 1.9 Grafica de esfuerzo-deformación para un acero dúctil.⁽⁹⁾

La Figura 1.9 muestra la relación entre esfuerzo unitario s y deformación unitaria ϵ , encontrada experimentalmente, mediante la gráfica esfuerzo-deformación para un material dúctil (Figura 1.9), y para un material frágil (Figura 1.10).⁽⁹⁾

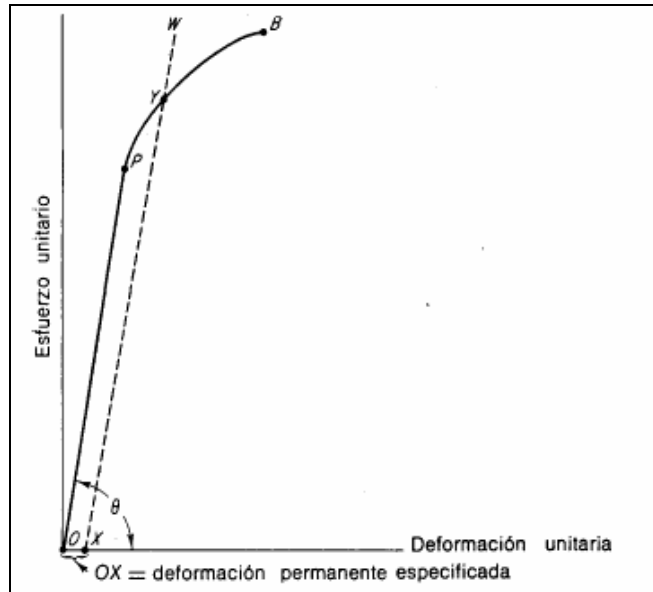


Figura 1.10 Grafica de esfuerzo-deformación para un acero frágil.⁽⁹⁾

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte: si se quita la carga en esa zona, la probeta regresa a su longitud inicial.

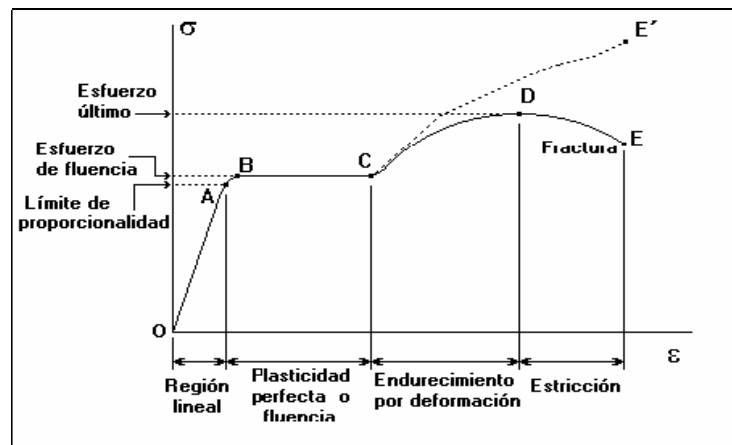


Figura 1.11 diagrama de esfuerzo-deformación.⁽¹⁰⁾

- Resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un material de absorber energía cuando es deformado elásticamente para luego liberarla una vez que la carga es eliminada. Esta capacidad es usualmente medida por el modulo de resiliencia, que es el esfuerzo requerido por unidad de volumen para tensionar el material desde un esfuerzo nulo hasta el valor de esfuerzo de fluencia o limite elástico. Puede ser también definida como el área bajo la curva en el intervalo elástico.⁽¹¹⁾

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente.

- Fluencia

La fluencia es la evidencia de deformación plástica en materiales estructurales. Solamente los aceros al carbono y los aceros de baja aleación presentan una marcada fluencia, y la importancia de estos metales como materiales estructurales nos han llevado a la especificación de los esfuerzos de fluencia como un elemento de control de calidad, y su uso como criterio de diseño.⁽¹⁰⁾

A partir de este punto, si se quita la carga la probeta quedaría más larga que al principio. Deja de ser válida nuestra fórmula $F = K (L - L_0)$ y se define que ha comenzado la zona plástica del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica es el punto de fluencia (yield point) y la fuerza que lo produjo la designamos como: $F = F_{yp}$ (yield point)

- Punto de fluencia

Es el primer esfuerzo en un material, generalmente menor que el esfuerzo máximo, al que un incremento de la resistencia ocurre sin que se presente un incremento en el esfuerzo. Solo ciertos metales (aquellos que presentan un localizado y heterogéneo tipo de transición de deformación de elástica a plástica) producen un punto de fluencia.

- Limite de fluencia

El Límite de fluencia o límite elástico aparente es el valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada

Luego de la fluencia sigue una parte inestable, que depende de cada acero, para llegar a un máximo en $F = F_{m\acute{a}x}$. Entre $F = F_{yp}$ y $F = F_{m\acute{a}x}$ la probeta se alarga en forma permanente y repartida, a lo largo de toda su longitud. En $F = F_{m\acute{a}x}$ la probeta muestra su punto débil, concentrando la deformación en una zona en la cual se forma un cuello.

- Carga máxima

Es la carga que presenta el máximo valor algebraico en el ciclo de carga. Las cargas de tracción son consideradas positivas y las cargas de compresión son consideradas negativas. Es usado para determinar la resistencia de miembros estructurales, es la carga que existe antes de que se presente la falla.

- Esfuerzo a carga máxima

Es el máximo esfuerzo que un material puede soportar sin fracturarse, es determinado al dividir la carga máxima por el valor original del área transversal de la probeta.

- Encuellamiento

Se define encuellamiento como la reducción del área transversal de una probeta de un material por estiramiento o tracción.

- Triaxialidad de esfuerzos

La formación de un cuello en la probeta de tracción introduce un estado complejo de tensiones triaxiales en esa región. La región del cuello es en efecto una entalla suave. Una entalla bajo tensiones origina tensiones radiales y transversales que elevan el valor de la tensión longitudinal requerida para producir un flujo plástico. Por lo tanto la tensión real media en el cuello, se determina al dividir la carga de tracción axial por el área mínima de la sección transversal en el cuello de la probeta, esta es más alta que la tensión necesaria para producir el flujo si prevaleciera una simple tracción. La Figura 1.12 muestra la geometría de la región del cuello y las tensiones desarrolladas por esta deformación localizada.⁽⁸⁾

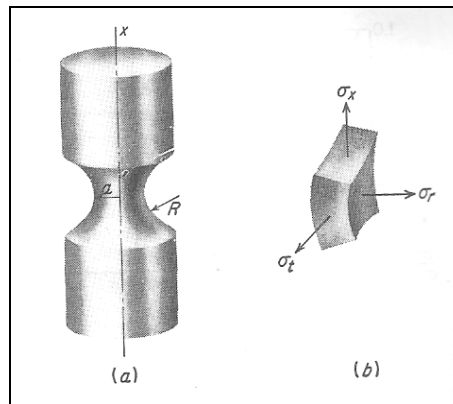


Figura 1.12 a) Geometría de la región de estricción localizada. b) tensiones que actúan sobre un elemento en el punto O.

La deformación se concentra en la zona del cuello, provocando que la carga deje de subir. Al adelgazarse la probeta la carga queda aplicada en menor área, provocando la ruptura.

- Tenacidad de fractura

La tenacidad de fractura es la energía requerida para producir la fractura.

La tenacidad se confunde frecuentemente con la dureza, a pesar de que su significado es completamente diferente.⁽¹²⁾

La tenacidad se define como la capacidad que tiene un material para absorber energía en el campo de deformación plástica sin romperse. Todos los materiales tienen grietas internas que se propagan más rápido mientras menos tenaz sea el material. Si el material es blando, esto es, se deforma con facilidad, la porción del material que rodea la grieta se deforma. Este proceso consume energía, lo que retarda la propagación de la grieta y consigue que el material sea tenaz. En los materiales duros esta deformación no puede ocurrir por lo que las grietas disponen de mucha más energía para propagarse, lo que lleva al material a tener una baja tenacidad.⁽¹²⁾

De lo anterior, pudiera deducirse que existe una relación inversa entre dureza y tenacidad, pero esto no es completamente cierto. La propagación de grietas depende de otros factores, como el tipo de proceso de deformación o las dimensiones de la grieta inicial. A pesar de esto, sí es posible decir que una tenacidad extrema nunca se encontrará junto a una dureza extrema.⁽¹²⁾

- Modulo de Young

Se denomina modulo de elasticidad o modulo de Young a la razón entre el incremento de esfuerzo aplicado a un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria que experimenta. Es un valor constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda un valor máximo denominado límite elástico. Tanto el modulo de Young como el límite elástico son distintos para los diferentes materiales.⁽⁸⁾

- Resistencia a la fractura

La resistencia de un material a la fractura mide la energía que puede absorber un cuerpo sin llegar a fracturarse.

- Limite elástico

Límite elástico (límite elástico convencional o práctico) es el valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.⁽⁸⁾

El límite de elástico es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican fuerzas sobre el material superiores a su límite de elasticidad este no recupera su forma original cuando dejan de aplicarse fuerzas sobre él.⁽⁸⁾

- Esfuerzo ingenieril y Deformación ingenieril

Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza externa que tiende a cambiar su forma o tamaño, el cuerpo se resiste a esa fuerza. La resistencia externa del cuerpo se conoce como esfuerzo y los cambios en las dimensiones del cuerpo que la acompañan se llaman deformaciones o alargamientos. El esfuerzo total es la resistencia interna total que actúa en una sección del cuerpo. Por lo general, la cantidad determinada es la intensidad de esfuerzo o esfuerzo unitario, definida como el esfuerzo por unidad de área. El esfuerzo unitario generalmente se expresa en unidades de libras por pulgadas cuadrada (psi) o MegaPascuales (MPa) y para una carga axial tensil o una compresiva, se calcula como la carga por unidad de área. La deformación o alargamiento total en cualquier dirección es el cambio total de una dimensión del cuerpo en esa dirección, y la deformación unitaria es la deformación o alargamiento por unidad de longitud en esa dirección.⁽¹⁰⁾

$$\text{Esfuerzo ingenieril } = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

$$\text{Deformacion ingenieril} = e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Ecuación 1.2

Donde A_0 es el área de la sección transversal de la probeta y F es la carga. La deformación ingenieril se obtiene al dividir el alargamiento de la distancia entre puntos por la longitud original de la probeta.

- Esfuerzo real-Deformación real

La prueba convencional de tensión descrita antes dará valiosa información hasta aproximarse y llegar al punto de cedencia. Más allá de este punto, los valores de esfuerzo son ficticios, ya que el área transversal real se reducirá considerablemente. Se define el esfuerzo real y la deformación real por las siguientes ecuaciones.

$$\text{Esfuerzo real} = \sigma_t = \frac{F}{A}$$

Ecuación 1.3

$$\text{Deformación real} = \epsilon_t = \int \frac{dl}{l_0} = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) = \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

Ecuación 1.4

Donde A es el área instantánea sobre la que se aplica la fuerza la carga F . La expresión $\ln(A_0/A)$ debe utilizarse después de iniciada la estricción.

El diagrama esfuerzo-deformación real (Figura 1.13) se compara con la curva esfuerzo-deformación ingenieril.⁽¹³⁾

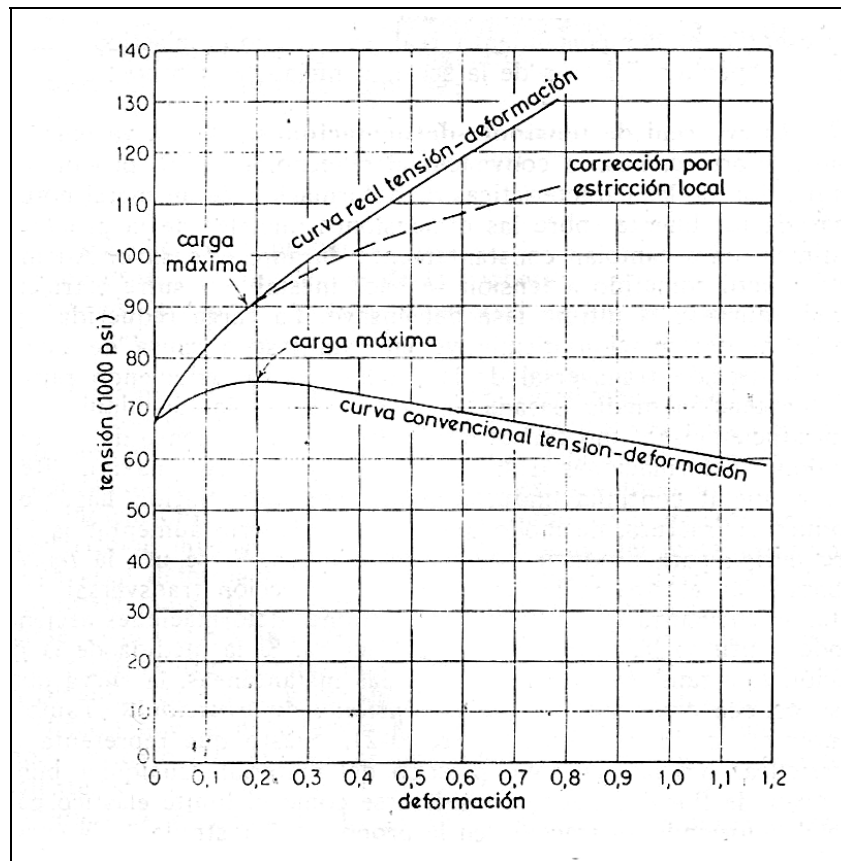


Figura 1.13 Relación entre el diagrama esfuerzo-deformación real, y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril.⁽¹³⁾

1.2.3 Efecto de la temperatura sobre las propiedades de tracción

Las propiedades a la tensión son afectadas de manera importante por la temperatura (Figura 1.17 y Figura 1.18). El esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a temperaturas elevadas, en tanto que la ductilidad, como medida del grado de deformación en la fractura, comúnmente se incrementa.⁽⁹⁾

En general, la resistencia mecánica disminuye y la ductilidad aumenta al incrementarse la temperatura de ensayo. Sin embargo por encima de ciertas temperaturas pueden producirse cambios estructurales, tales como la precipitación, el envejecimiento por deformación o la recrystalización, que alteren este comportamiento general.⁽¹⁴⁾

En la Figura 1.14 se muestra esquemáticamente el cambio sufrido en la curva de esfuerzo-deformación convencional, correspondiente a un acero suave, a causa de la variación de la temperatura. Las variaciones de las propiedades de tracción del acero con la temperatura se muestran en la Figura 1.15 la resistencia mecánica aumenta al mismo tiempo que la temperatura se eleva sobre la ambiente. La Figura 1.16 muestra la variación del limite elástico convencional con la temperatura en el tantalio, wolframio, molibdeno y hierro (red cúbica centrada en el cuerpo) y en el níquel (red cúbica centrada en las caras).⁽¹⁴⁾

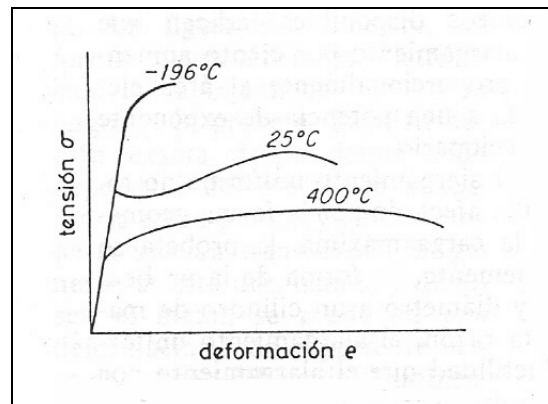


Figura 1.14 Variación de las curvas esfuerzo-deformación de un acero suave con la temperatura.⁽¹⁴⁾

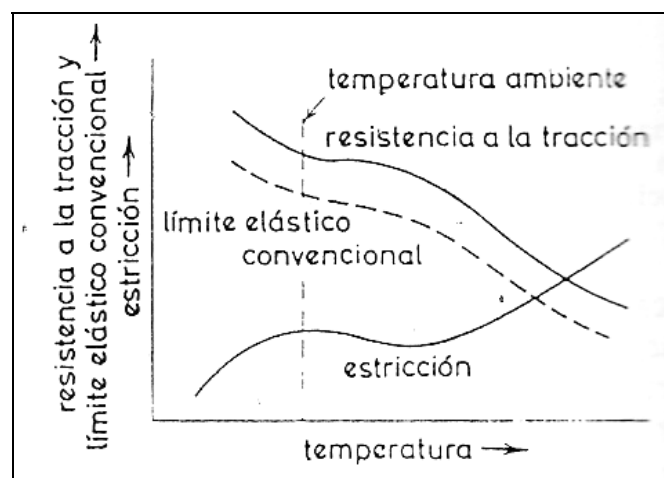


Figura 1.15 Variación de las propiedades de tracción del acero con la temperatura.⁽¹⁴⁾

Es de destacar que el límite elástico convencional del níquel aumenta con el descenso de la temperatura en menor proporción que los metales de red cúbica centrada en el cuerpo. Esta diferencia en la dependencia de la temperatura del límite elástico convencional, se cree es significativa al explicar porque los metales con red cúbica centrada en las caras no presentan una fractura frágil a bajas temperaturas.⁽¹⁴⁾

La Figura 1.17 muestra la variación de la estricción con la temperatura en los mismos metales. Se puede observar como el wolframio es casi completamente frágil a 200°C y el hierro a -200°C, mientras que el níquel pierde poca ductilidad a lo largo de todo el intervalo de temperaturas. La falta de una transición frágil en el níquel es una característica general de los metales con red cúbica centrada en las caras y guarda relación con la escasa dependencia con la temperatura de su límite elástico.

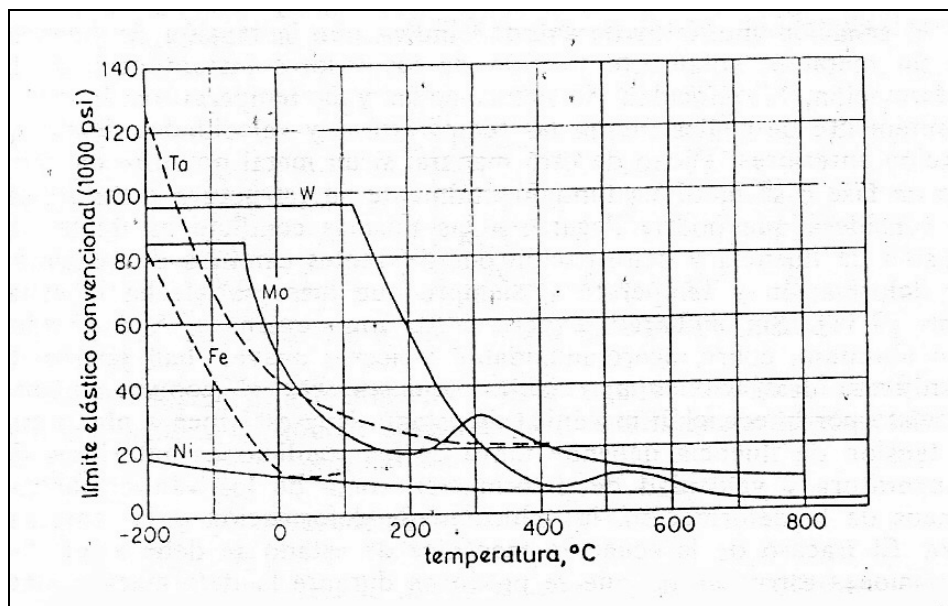


Figura 1.16 Efecto de la temperatura en el límite de elasticidad de los metales bcc (Ta, W, Mo y Fe) y fcc (Ni).⁽¹⁴⁾

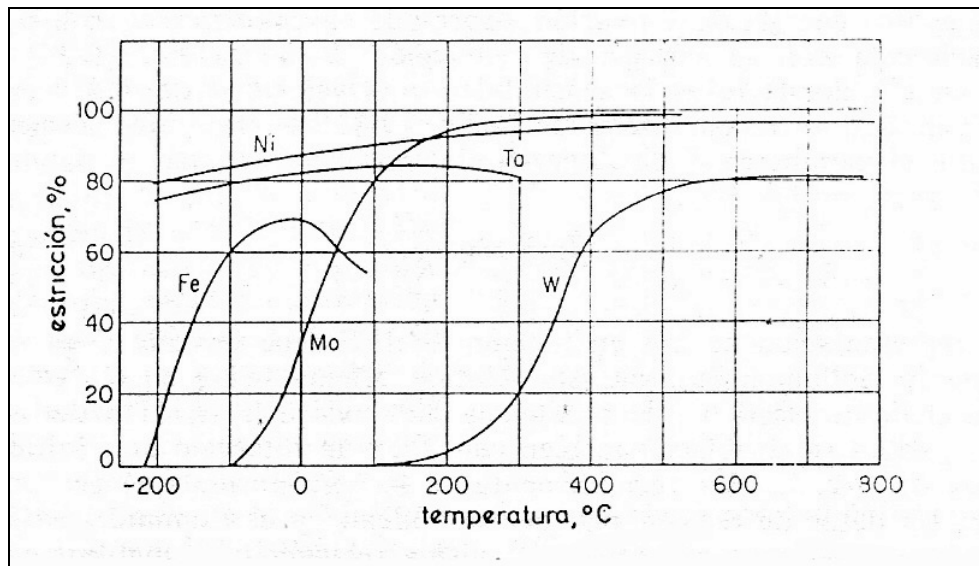


Figura 1.17 Efecto de la temperatura sobre la estricción del Ta, W, Mo, Fe y Ni.⁽¹⁴⁾

1.2.4 Efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de tracción

La curva de esfuerzo-deformación convencional, a temperatura ambiente, no se modifica en forma apreciable por los cambios de velocidad en los ensayos de tracción. Los ensayos de tracción a altas velocidades, han mostrado que el límite elástico es más sensible a los aumentos en la velocidad de deformación que la resistencia a la tracción. Las altas velocidades dan lugar a la aparición del límite elástico aparente en probetas de acero con bajo contenido de carbono. El efecto de las velocidades de deformación en la resistencia creciente a la deformación aumenta generalmente en ensayos a altas temperaturas. La Figura 1.18 muestra el efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia mecánica a la tracción del cobre a diversas temperaturas.

Es difícil determinar una relación matemática entre el esfuerzo de fluencia y la velocidad de deformación, esto se debe a muchos problemas que se presentan para la medición de algunas propiedades de tracción a altas velocidades.

Los ensayos en que se somete la probeta a una velocidad constante de deformación real, no puede realizarse fácilmente con máquinas de ensayo convencionales. Aunque es muy fácil mantener la velocidad del cabezal móvil constante, esto no asegura una velocidad de deformación constante en la probeta, puesta que la velocidad de deformación que esta experimenta aumenta con la carga, especialmente durante la estricción. Para poder mantener la velocidad de deformación real constante, la velocidad del cabezal móvil deberá aumentar proporcional al incremento de la longitud de la probeta.⁽¹⁴⁾

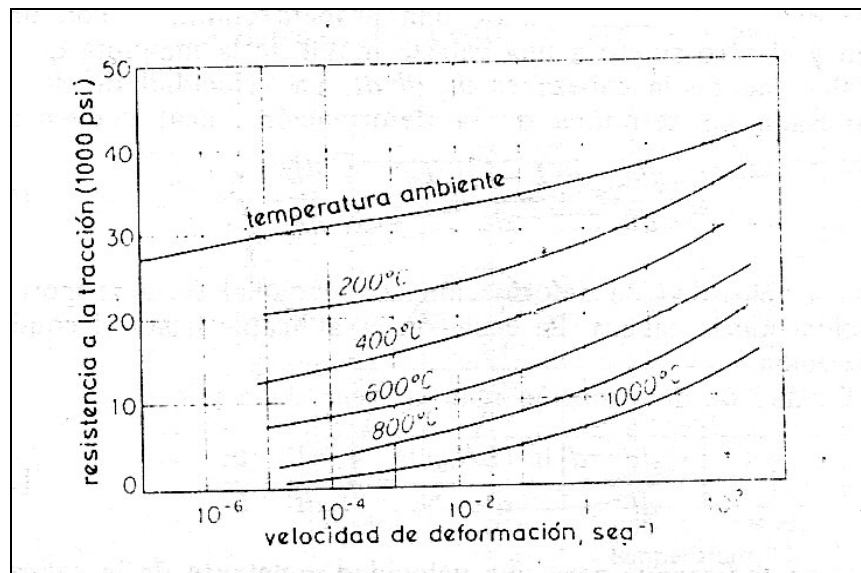


Figura 1.18 Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la tracción del cobre en ensayos a diversas temperaturas.⁽¹⁴⁾

1.2.5 Ensayos de tracción a bajas temperaturas

Los ensayos de tracción a bajas temperaturas son realizados como parte de las medidas de control de calidad o para la caracterización general de materiales que son utilizados a temperaturas relacionadas con aplicaciones criogénicas.⁽¹⁵⁾

Las mediciones pueden ser realizadas con equipos que están disponibles en la mayoría de los laboratorios metalúrgicos (Figura 1.19), y el ensayo puede durar pocos

minutos, sin tomar en cuenta el período de enfriamiento. A pesar de que estas ventajas simplifican las pruebas de control de calidad, un ensayo de tracción debe ser usado con precaución como un indicador del nivel de calidad, debido a que la relevancia del ensayo está limitada por su correlación con el desempeño.⁽⁸⁾ En otras palabras, un material puede pasar previamente un control de calidad establecido según norma para resistencia a la tracción y ductilidad, y a la vez puede ser inaceptable para las condiciones de operación deseadas. De esta manera, deben ser realizados ensayos adicionales como fatiga, dureza, resistencia a la corrosión y fluencia lenta “creep”, así como estudios microestructurales, para una evaluación adecuada de un material.



Figura 1.19 Máquina universal de ensayos mecánicos, Instron 5585.

Los ensayos de tracción a bajas temperaturas se realizan básicamente con las mismas probetas y procedimientos que los realizados a temperatura ambiente. En este caso las probetas deben ser enfriadas en una cámara ambiental (Figura 1.20), y los dispositivos de ensayo deben ser suficientemente fuertes y resistentes a la corrosión, además de que los equipos de medición deben poder soportar las temperaturas de los ensayos.⁽¹⁵⁾



Figura 1.20 Cámara ambiental, Eurotherm MTS Systems Corporation, modelo 651.06E-03.

- Características Generales

Los diagramas esfuerzo-deformación a bajas temperaturas son similares en apariencia a los realizados a temperatura ambiente (Figura 1.21). A medida que la temperatura desciende desde la ambiente, los materiales se vuelven más fuertes pero menos dúctiles (Figura 1.22 y Figura 1.22).⁽¹⁵⁾

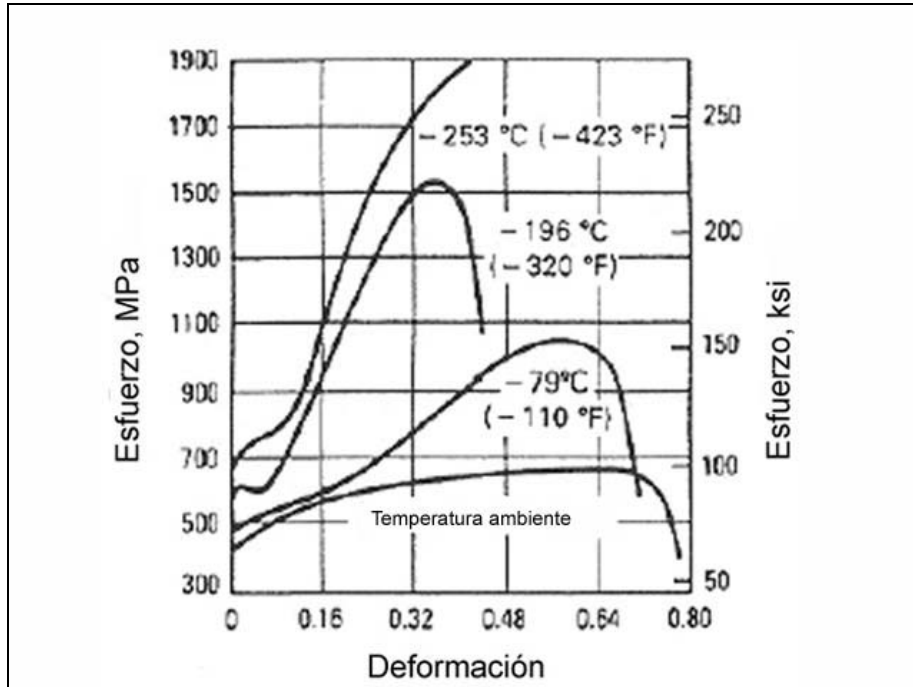


Figura 1.21 Diagrama esfuerzo-deformación a bajas temperaturas para un acero inoxidable 304.⁽¹⁵⁾

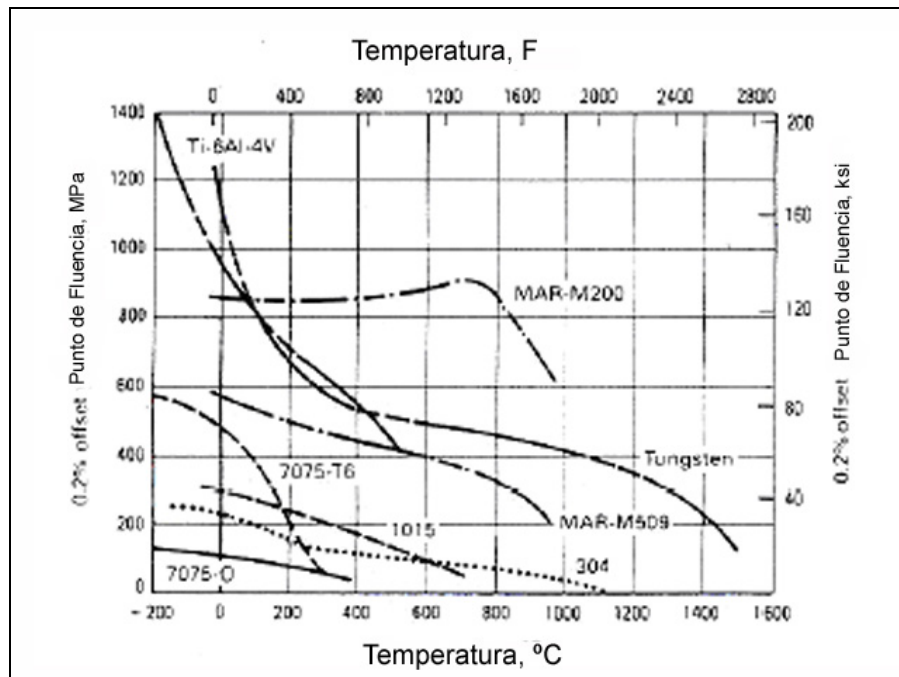


Figura 1.22 Efecto de la temperatura en la resistencia de varios materiales.⁽¹⁵⁾

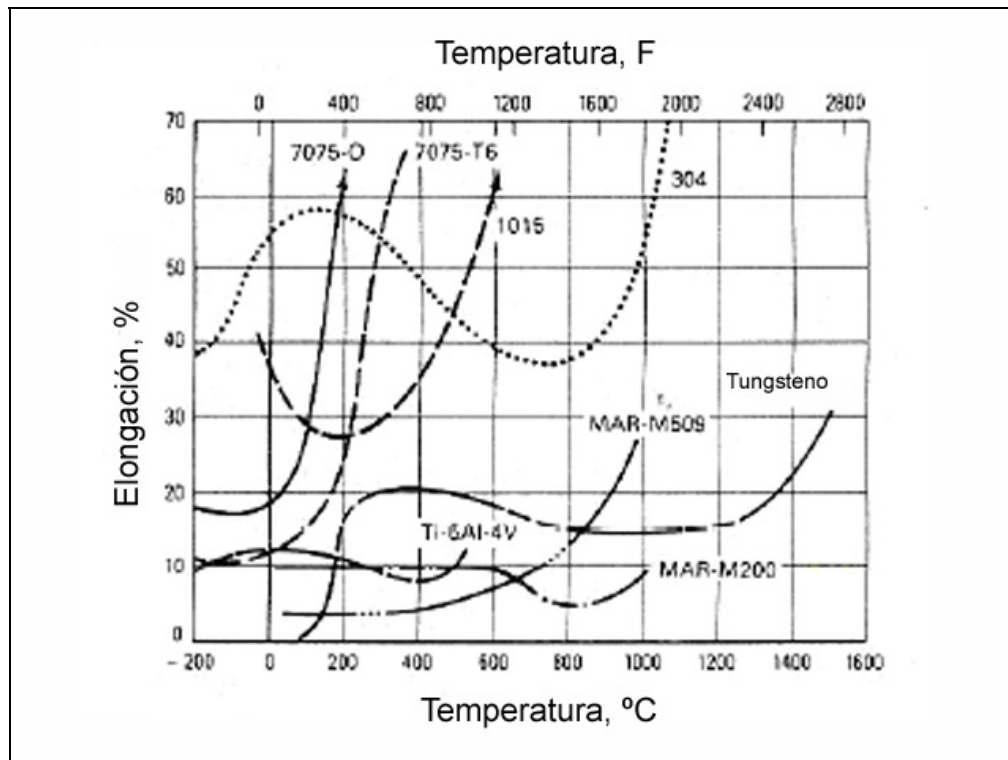


Figura 1.23 Efecto de la temperatura en la ductilidad de varios materiales.⁽¹⁵⁾

Debido a la relativamente alta tasa de deformación (usualmente $8.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ y $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) que se producen en los ensayos de tracción, la deformación ocurre por desplazamiento (deslizamiento de dislocaciones a través de planos cristalográficos definidos). Así, los cambios en la resistencia y ductilidad debidos a la temperatura generalmente pueden ser relacionados con el efecto de la temperatura en los deslizamientos. A bajas temperaturas (menos de 0.3 temperatura homóloga, que es la relación de la temperatura de ensayo respecto al punto de fusión del material, ambas en Kelvin), el número de sistemas de deslizamiento está limitado y los procesos de recuperación son imposibles. Por lo tanto, los mecanismos de endurecimiento por deformación, como la interacción entre las dislocaciones y los apilamientos, son responsables de las grandes fuerzas requeridas para la deformación continua. Esto sigue hasta que los esfuerzos locales en los apilamientos exceden el esfuerzo de fractura y ocurre la falla.⁽¹⁵⁾

La deformación bajo condiciones de tensión está gobernada en gran medida por la estructura cristalina. Los materiales cúbicos centrados en las caras presentan un

cambio gradual en la resistencia y la ductilidad a medida que la temperatura desciende (Figura 1.22 para el acero inoxidable 304). Algunas aleaciones cúbicas centradas en las caras, al contrario, muestran cambios abruptos a la temperatura de transición dúctil-frágil (aproximadamente a 200°C o 390°F para el tungsteno en la figura 1.23) en donde hay bajo flujo plástico. En materiales hexagonales compactos y cúbicos centrados en las caras la formación en agregado de cristales también puede ocurrir durante el ensayo. De igual manera, esta formación contribuye poco para la elongación total; su papel más importante es el de reorientar sistemas de deslizamiento desfavorables anteriores a posiciones en las que ellos puedan ser activados.⁽¹⁵⁾

Otros factores pueden afectar el comportamiento a tracción, pero los efectos específicos no pueden ser predichos fácilmente. Estos procesos pueden provocar una gran variedad de respuestas en el comportamiento mecánico, dependiendo del material. Los procesos de difusión también están relacionados con el punto de fluencia y con los fenómenos de envejecimiento por deformación. Bajo ciertas combinaciones de tasa de deformación y temperatura, los átomos intersticiales pueden ser arrastrados con dislocaciones, o las dislocaciones pueden disociarse y luego recombinarse, produciendo saltos en la curva esfuerzo-deformación. Hay excepciones para estas generalizaciones, especialmente a altas temperaturas.⁽¹⁵⁾

- Métodos Experimentales

Los métodos y procedimientos específicos para realizar los ensayos a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas han sido normalizadas por ASTM en las normas E8 y E21 respectivamente. A pesar de que no ha sido adoptada ninguna norma para realizar ensayos a bajas temperaturas, los requerimientos generales de ASTM E8 y E21 pueden ser logrados a bajas temperaturas. Asumiendo que para los ensayos es usada una máquina con un apropiado control de la carga y de la velocidad, la validez de un ensayo reside en la medición de la deformación, el control de la temperatura y el comportamiento del material.

- ✓ Medición de la deformación: El método más simple de medir la deformación está basado en el desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayos. Pero, el

desplazamiento del cabezal incluye no sólo la deformación en la sección calibrada, sino también la deformación en el resto de la muestra, el tren de carga y la máquina de ensayos. Este método es conveniente solo para mediciones de grandes deformaciones plásticas donde otros factores pueden ser despreciados. Para una determinación precisa de la deformación debe ser usado un extensómetro. Éstos van acoplados directamente a la probeta, lo que excluye cualquier contribución de la máquina de ensayos. No obstante, también pueden ser aplicados métodos correctivos que consideran la deformación elástica de los elementos de máquina involucrados con la aplicación de la carga en los especímenes.

- ✓ Control de la temperatura: La temperatura actual debe ser mantenida a pocos grados de la temperatura deseada y no puede fluctuar considerablemente con el tiempo o variar a lo largo de la longitud calibrada. La selección del termopar adecuada depende del ambiente y temperatura del ensayo. La temperatura del ensayo puede ser controlada adecuadamente con uno de los tantos tipos de controladores de temperatura disponibles en el mercado que refieren la fuerza electromotriz del termopar central. La posibilidad de minimizar el gradiente de temperatura a lo largo de la longitud calibrada depende del método de enfriamiento. A pesar de que la inmersión dentro de líquidos, gases o mezclas como hielo seco/acetona puede proporcionar temperaturas uniformes, los sistemas de refrigeración con fluidos refrigerantes líquidos puede ser problemático y requiere mezclar y/o incrementar el flujo del refrigerante para minimizar el gradiente. Un control apropiado de la temperatura de ensayo y la minimización del gradiente térmico a lo largo de la longitud calibrada son importantes debido a la dependencia de los mecanismos de flujo plástico y el comportamiento del material a la temperatura. Por ejemplo, los puntos calientes de las probetas generalmente serán más débiles que el resto de ella y pueden convertirse en lugares para deformaciones localizadas y falla prematura, lo que se traduce en información imprecisa y poco confiable del ensayo de tracción.
- ✓ Comportamiento del material: El ambiente del ensayo puede afectar las propiedades evaluadas. Generalmente, la atmósfera debe reflejar el uso que se

supone que tendrá el material. A pesar de que el ambiente no podrá ser nunca una simulación exacta de las condiciones de operación, éste debe producir los mismos efectos básicos y no debe introducir mecanismos de ataque ajenos.

- Probetas para Ensayos de Tracción Uniaxial

El tipo de la probeta utilizada va a depender del tipo de ensayo, del equipo, su capacidad, y la disponibilidad del material. La preparación de las probetas requiere el máximo cuidado debiendo ser maquinadas en un torno de precisión, lubricado abundantemente para que la temperatura no supere los 50° C, dejando 0,2mm de tolerancia y rectificadas con refrigeración abundante.⁽¹⁵⁾ Las probetas utilizadas por los diferentes grupos de investigación y evaluación que han estudiado las propiedades de los materiales a tracción son muy diversas, tanto del punto de vista de la forma como de las dimensiones. El ejemplo más significativo para este trabajo, es la probeta para ensayos de tracción uniaxial dispuesta en la norma ASTM A370 tal como se muestra en la Figura 1.24.



Figura 1.24 Probeta para Ensayos de Tracción Uniaxial según Norma ASTM A370.

1.2.6 Comportamiento de los aceros a bajas temperaturas

Con el rápido desarrollo de la industria de las bajas temperaturas en estos últimos años, entre las cuales se puede mencionar la industria del oxígeno, el transporte de grandes cantidades de metano desde las zonas donde se produce, nace la necesidad de estudiar un tipo de material metálico económico, dúctil a las bajas temperaturas de hasta -196°C, para la construcción de todos aquellos elementos de producción, transporte y almacenamiento.

La Criogenia es el estudio de temperaturas muy bajas, y de la producción de las mismas, es la ciencia del frío, y su nombre, tiene su origen el griego, en la palabra “kryos” que significa “hielo frío”. La Criogenia es un conjunto de técnicas para la obtención de bajas temperaturas, este termino es utilizado en la industria para referirse a temperaturas que se encuentran en un rango cercano a los -100°C .⁽¹⁶⁾

Los aceros al carbono y las aleaciones para servicios a bajas temperaturas necesitan brindar una alta resistencia, ductilidad y tenacidad en vehículos, recipientes y estructuras que deberán funcionar a temperaturas por debajo de -45°C . Debido a que un gran número de aceros están especialmente diseñados para trabajar a bajas temperaturas, la selección del material óptimo viene de un completo entendimiento de la aplicación y un conocimiento de las propiedades mecánicas que cada acero brinda.

Existen muchos aceros que se comportan muy bien a temperaturas de servicio relativamente bajas. En el manejo, almacenamiento y transporte de los gases licuados, como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y helio, hay relativamente pocos aceros capaces de soportar estas condiciones de trabajo. Estos gases licuados bullen a temperaturas conocidas como criogénicas, es decir, alrededor de -70°C .⁽⁷⁾

Para evitar el problema de la fractura frágil, las estructuras y los equipos están diseñados para minimizar la concentración de esfuerzos y para emplear materiales que, basados en ensayos y pruebas de campo, tendrán un alto nivel de tenacidad bajo condiciones de servicio.

A temperaturas por debajo de la ambiente el comportamiento de un metal está caracterizado un poco por su estructura cristalina. En los aceros cúbicos centrados en el cuerpo (hierro, molibdeno, vanadio y cromo) la resistencia a la tracción y a la fluencia, dependen en gran medida de la temperatura. Estos metales muestran una pérdida de ductilidad en una región pequeña de temperaturas por debajo del ambiente.

La resistencia a la tracción de los metales con estructuras cúbicas centradas en las caras (aluminio, cobre, níquel y acero inoxidable austenítico) es más dependiente de la

temperatura que su esfuerzo de fluencia, y estos metales usualmente aumentan su ductilidad a medida que la temperatura disminuye.⁽⁷⁾

Aunque la tenacidad de un material a bajas temperaturas es de extrema importancia en el diseño de equipos criogénicos, otras propiedades deben tomarse en cuenta. Por ejemplo, las propiedades de tracción de un material son importantes debido a que éstas determinan los espesores de dichos equipos. Además, las características de expansión térmica de los materiales, debido a que grandes cambios en la temperatura pueden imponer a su vez grandes esfuerzos en alguna pieza de un equipo. También, debido a que las temperaturas criogénicas son difíciles de mantener, la conductividad térmica y el calor específico del material son importantes para los diseñadores de equipos criogénicos.

Una familia de aceros que son muy usados en estas condiciones de servicio por su excelente desempeño son los aceros inoxidable austeníticos.

Las transformaciones que ocurren en la composición que es normalmente estable a temperatura ambiente pero metaestable a temperaturas criogénicas, pueden alterar grandemente el comportamiento. Por ejemplo, la combinación de una gran deformación plástica y temperaturas criogénicas puede causar que un acero normalmente dúctil y tenaz, como el 301, 302, 304, 321, transformen parcialmente su estructura a cúbica centrada en el cuerpo (BCC), lo que perjudica la ductilidad y tenacidad. Un acero inoxidable completamente estable como el 310, no puede ser transformado a temperaturas criogénicas.

1.3 ANTECEDENTES.

Como es sabido, los aceros inoxidables representan un importante y creciente segmento en la industria. La importancia de los aceros inoxidables está relacionada en muchas áreas del campo industrial, destacando entre ellas las aplicaciones criogénicas.

En este sentido se ha realizado mucha investigación, donde destaca: Medvedev y Kirillow.⁽¹⁷⁾ Ellos, en el año de 1977 estudiaron el efecto de la tasa de deformación y condiciones de enfriamiento en plasticidad a bajas temperaturas de aceros inoxidables Fe-Cr-Ni. Su estudio se basó en la realización de ensayos de tracción a tasas de deformación constante y a su vez se utilizó hidrogeno liquido, helio gaseoso o hidrogeno para enfriar o disminuir la temperatura de la muestra in situ.

Dentro de sus resultados más importantes, destaca el hecho que las propiedades mecánicas de probetas ensayadas a tasa de deformación constante y a una misma temperatura varían dependiendo de las condiciones de enfriamiento del material, de esta manera al utilizar un refrigerante gaseoso en lugar de hidrógeno líquido decrece la resistencia a la tracción.

Luego en 1980, Charles et al.⁽¹⁸⁾ presentaron resultados sobre su estudio de la influencia de la adición de carbono y aluminio en las propiedades mecánicas a tracción uniaxial de una aleación de acero inoxidable austenítico libre de níquel, que es particularmente interesante para aplicaciones criogénicas. Charles realizó ensayos de tracción uniaxial a temperatura ambiente y a -196°C, sobre aceros a los que les fueron añadidos estos elementos aleantes, para así poder determinar las propiedades mecánicas a tracción de este material. De sus conclusiones se pueden destacar dos, que son las de mayor relevancia para nuestro trabajo, al añadir carbono y aluminio hace posible aumentar la estabilidad de la fase austenita y evitar la transformación de austenita-martensita, presentándose de esta manera un aumento en el esfuerzo de fluencia. También destacó el hecho que la solución utilizada en la fabricación de este acero es endurecedora de la fase austenita, y que este endurecimiento ocurre sin ninguna pérdida de ductilidad.

En 1981, Read et al.⁽¹⁹⁾ Realizaron estudios sobre las propiedades de resistencia y fractura de un grupo de aceros inoxidable austeníticos a temperaturas criogénicas. Read realizó ensayos de tracción a cinco aceros inoxidable austeníticos, entre los cuales se encuentran el AISI 304, 316, 304LN Y 316LN y una aleación con un contenido de nitrógeno mayor que el de los otros anteriores. Los dos principales descubrimientos de Read fueron, se presenta una variación sistemática e inversamente proporcional entre la tenacidad de fractura y el esfuerzo de fluencia, y un incremento aparente del esfuerzo de fluencia con un aumento de la cantidad de nitrógeno en la aleación.

Ogata e Ishikawa ⁽²⁰⁾, realizaron en 1986, un estudio de la dependencia del tiempo de la deformación de aceros inoxidable austeníticos a temperaturas criogénicas. Ellos realizaron ensayos de tracción uniaxial en condición de carga constante a aceros AISI 304L, 310S Y 316L. Ellos se encontraron que una grande y abrupta deformación tiene lugar en los ensayos al alcanzar una temperatura igual a -269°C (4K) y que la magnitud de esta deformación va a depender de la tasa de endurecimiento por deformación y de la estabilidad de la fase austenita.

En el año de 1990, Siewert et al.⁽²¹⁾ realizó un estudio de las propiedades mecánicas de la soldadura de materiales para aplicaciones criogénicas. Los ensayos consistieron en pruebas de tracción uniaxial hasta la fractura, entre otros. Ellos determinaron que los cordones de soldadura realizados en acero inoxidable tipo 316L producen juntas soldadas con la mejor combinación de resistencia y ductilidad a temperaturas entre 22°C y -269°C en todos los ensayos realizados.

En años posteriores Nishimura (1997) et al.⁽²²⁾ estudiaron las propiedades mecánicas relevantes para diseño de los aceros inoxidable tipo 316 para la fabricación de imanes superconductores. Nishimura realizó ensayos de tracción uniaxial, creep y fatiga. Entre los resultados de mayor importancia para nosotros tenemos que el punto de fluencia aumenta de manera exponencial a temperaturas criogénicas y es fuertemente dependiente del contenido de carbono y nitrógeno. Así mismo encontraron que el esfuerzo de fluencia y la tenacidad de fractura son inversamente proporcionales.

También se obtuvo que la tenacidad de fractura de los aceros inoxidable tipo 316 puede ser mejorada al incrementarse el contenido de nitrógeno en las aleaciones, pero que algunas propiedades como la soldabilidad se ven afectadas.

En el 2001, Sun et al.⁽²³⁾ realizaron estudios de las propiedades de tracción de un acero inoxidable austenítico a bajas temperaturas y una atmósfera de hidrógeno. Ellos realizaron ensayos de tracción uniaxial a bajas temperaturas a los aceros inoxidables 304 y 304L, encontrando que para el acero 304L la fragilización por hidrógeno aumenta al disminuir la tasa de deformación. Para ambos la fragilización por hidrógeno aumenta al disminuir la temperatura, alcanzando un máximo, para luego disminuir al continuar bajando la temperatura.

Para el año 2002 Freudenberg et al.⁽²⁴⁾ se encontraban estudiando el comportamiento mecánico de aceros inoxidables con un alto contenido de nitrógeno para aplicaciones criogénicas. El acero utilizado fue un acero inoxidable austenítico 3033, las probetas fueron ensayadas a diferentes temperaturas evaluando así la variación del comportamiento mecánico del material. De sus conclusiones la más importante para nuestra investigación es que los aceros inoxidables con alto contenido de nitrógeno presentan unas propiedades mecánicas ventajosas a temperaturas criogénicas.

CAPITULO II

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 ORGANIGRAMA DE TRABAJO.

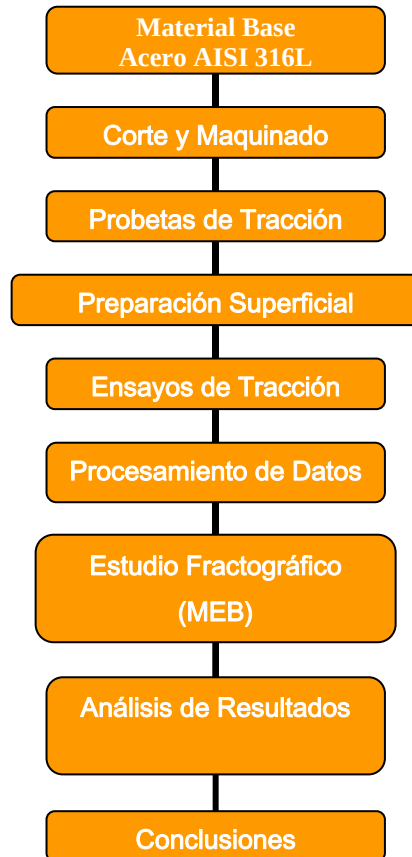


Figura 2.1 Organigrama de Trabajo.

2.1.1 Obtención de Material.

El material fue suministrado en forma de barras con dimensiones de 1.27 cm de diámetro y 610 cm de largo. Las barras son de un Acero Inoxidable Austenítico AISI 316L.

2.1.2 Mecanizado y Pulido.

Las barras se cortaron en secciones de 350 cm de longitud. Posteriormente fueron maquinadas 50 probetas bajo la norma ASTM A370, cuyas dimensiones se muestran en la Figura 2.2.

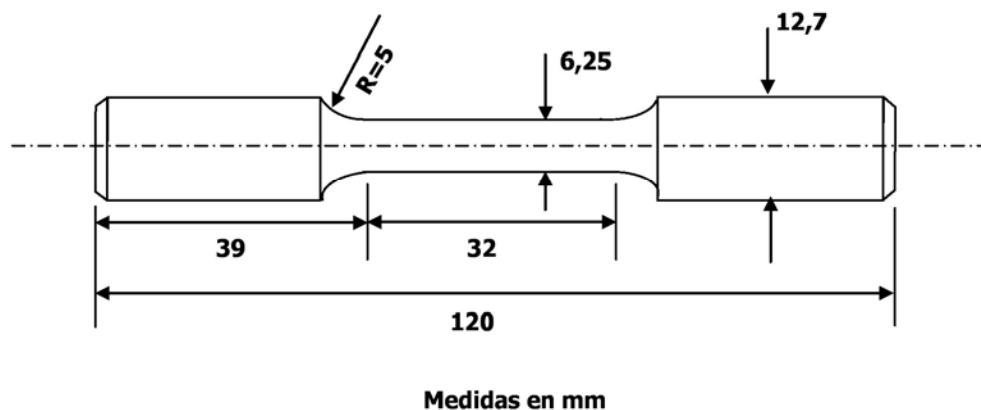


Figura 2.2 Probeta para Ensayos de Tracción Uniaxial según Norma ASTM A370.

Las probetas fueron preparados superficialmente a través de un desbaste con papel esmeril N° 400 marca 3M, en serie hasta para ser pulidas con papel esmeril N° 2000 de la misma marca. Eso se realizó hasta lograr un acabado superficial óptimo. Para la preparación superficial se utilizó un torno marca MYFORD modelo ML7-R. Ver Figura 2.3.



Figura 2.3 Torno Myford modelo ML7-R.

2.1.3 Ensayos de Tracción.

El ensayo de tracción se realizó a tres probetas, los valores obtenidos para cada uno de estos ensayos corresponden a la carga aplicada (F_i) y el alargamiento de la probeta (L_i , sin corrección por deformación elástica de los componentes de la máquina). También se realizaron mediciones del diámetro inicial y final de cada probeta, con un vernier digital a fin de determinar el área inicial y final de la sección transversal en la zona de fractura.

Con la finalidad de corregir los efectos introducidos por la deformación elástica de los componentes de la máquina pertenecientes al sistema de carga, se procesaron los datos obtenidos en cada ensayo aplicando una ecuación para obtener el alargamiento real de las probetas, cuya fórmula es:

$$(\Delta L_i)_{corr} = \Delta L_i - F_i * \left(\frac{K_{teo} - K_{exp}}{K_{teo} * K_{exp}} \right)$$

Ecuación 2.1

Donde:

$(\Delta L_i)_{corr}$ = Elongación corregida de la probeta.

ΔL_i = Elongación sin corregir de la probeta.

F_i = Fuerza con que se carga la máquina.

K_{teo} = Rigidez teórica de la probeta.

K_{exp} = Rigidez experimental del conjunto.

A su vez se tiene que:

$$K_{teo} = \frac{A_0 * E}{L_0}$$

Ecuación 2.2

$$K_{exp} = \frac{\sum F_i}{\sum \Delta L_i}$$

Ecuación 2.3

Donde:

A_0 = Área inicial de la sección transversal de ensayo ($A_0 = \pi * D_0^2 / 4$).

E = Módulo de elasticidad inicial del acero inoxidable austenítico (190 GPa).

L_0 = Longitud inicial de la sección de ensayo (32 mm).

Una vez corregidos los datos $(\Delta L_i)_{corr}$, se procedió a construir la curva de esfuerzo-deformación (curva real) correspondiente a cada muestra a partir de los valores ingenieriles.

Donde:

$S_i = F_i / A_0$ esfuerzo ingenieril.

$e_i = (\Delta L_i)_{corr} / L_0$ deformación ingenieril.

$\sigma_i = S_i(1 + e_i)$ esfuerzo real.

$\epsilon_i = \ln(1 + e_i)$ deformación real.

Esta curva permitió conocer; el esfuerzo de fluencia σ_y a 0,02% y el esfuerzo real a carga máxima σ_{uts} , para cada una de las probetas.

2.1.4 Estudio Fractográfico.

El estudio fractográfico se realizó por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Este consistió en observar la superficie de fractura de las probetas, permitiendo apreciar ciertos parámetros que caracterizan la fractura del componente.

El análisis fractográfico comienza con una observación visual de las características de la superficie de fractura. Se pueden obtener así los primeros indicios de las causas de la nucleación de la grieta, mecanismo y dirección de la propagación, y se puede tener alguna estimación de la magnitud de las cargas actuantes. Pero el análisis de la superficie a mayores aumentos, como los que proporciona el microscopio electrónico de barrido, permite la caracterización del proceso microscópico de propagación de la grieta, identificando así las cavidades típicas de la rotura trasgranular dúctil, las facetas de clivaje de una rotura frágil, las superficies de corrosión bajo tensiones o las estrías típicas de un proceso de fatiga.

Las técnicas fractográficas pueden aportar también información sobre la tenacidad del material del componente fracturado. La fragilidad o ductilidad del material quedan en general reveladas en la superficie de fractura. Una aleación más bien dúctil presenta una superficie de fractura con las cavidades características (dimples), pero un material más bien frágil rompe preferentemente por un mecanismo de clivaje trasgranular. En el caso general estos modos de fractura aparecen mezclados, pero la proporción relativa de los distintos tipos es indicativa de las propiedades mecánicas del

material. Una observación fractográfica también permite estimar cualitativamente la magnitud de las tensiones actuantes.

2.2 DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS.

2.2.1 Torno.

Para la preparación superficial de las probetas en la zona calibrada antes de ser ensayadas se uso un torno MYFORD modelo ML7-R. Ver Figura 2.3.

2.2.2 Maquina de Tracción.

Los ensayos se realizaron en la Universidad Politécnica de Catalunya con colaboración del Centro Tecnológico de Manresa, España, con una máquina universal de ensayos mecánicos, marca INSTRON modelo 5585 (Figura 1.19 y Figura 2.4). Se realizaron ensayos mecánicos a velocidades de desplazamiento de cabezal móvil constante (1mm/min, 10mm/min y 100mm/min) y a diferentes temperaturas (25°C, 0°C, -10°C, -30°C, -50°C, -70°C y -100°C). Ver Figura 2.5.



Figura 2.4 Máquina universal de ensayos mecánicos, Instron 5585, con el montaje de la cámara ambiental, Eurotherm MTS Systems Corporation 651.06E-03.

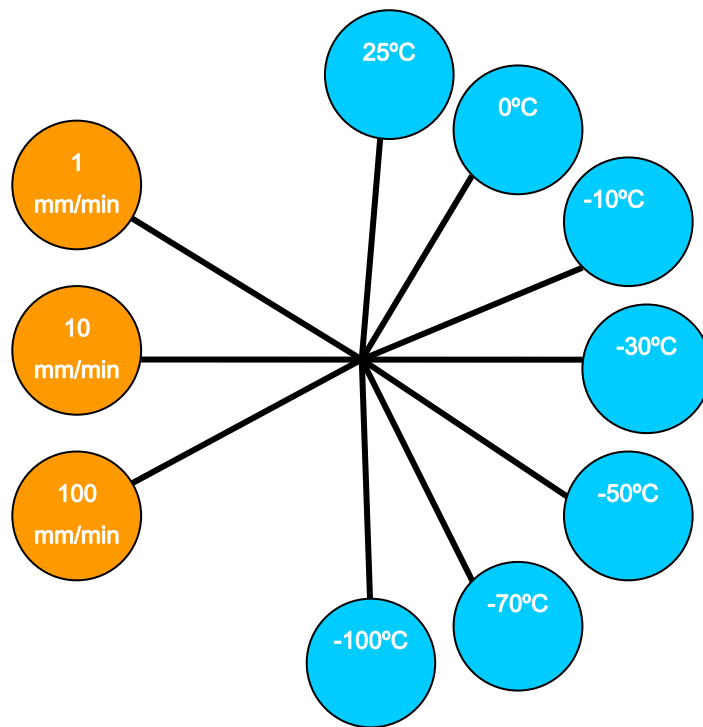


Figura 2.5 Condiciones de ensayo, tres velocidades de cabezal móvil constantes y siete temperaturas diferentes.

2.2.3 Cámara Ambiental.

Los ensayos se realizaron en la Universidad Politécnica de Catalunya con colaboración del Centro Tecnológico de Manresa, España, con una cámara ambiental marca Eurotherm MTS Systems Corporation, modelo 651.06E-03. Ver Figura 1.20 y Figura 2.6.



Figura 2.6 Montaje de las probetas dentro de la cámara ambiental Eurotherm MTS Systems Corporation 651.06E-03.

2.2.4 Cortadora de Disco Abrasivo.

Los cortes de las muestras para el estudio fractográfico (de superficies de fracturas) por MEB, fueron realizados en una cortadora de disco abrasivo, marca BUEHLER, modelo ABRASIMET 2, ubicada en la Universidad Politécnica de Catalunya, España.



Figura 2.7 Cortadora de disco abrasivo, marca BUEHLER, modelo ABRASIMET 2.

2.2.5 Microscopio Electrónico de Barrido.

Las imágenes para el estudio fractográfico fueron obtenidas a través de un microscopio electrónico de barrido, ubicado en la Universidad Politécnica de Catalunya, España.

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y SUS ANALISIS

En este capitulo se exponen y discuten los resultados del estudio de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L deformado a temperaturas criogénicas. Primero se contemplan los resultados de los ensayos de tracción realizados en condiciones diferentes de velocidad de cabezal móvil constante a diversas temperaturas, y en segundo termino se realiza el estudio fractográfico de la superficie de fractura de las probetas ensayadas.

3.1 ENSAYOS DE TRACCION.

Los resultados de los ensayos de tracción han sido divididos en cuatro grupos o partes, haciendo referencia primero a los resultados presentados de manera de poder apreciar el efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico del material a una velocidad de cabezal móvil constante, y luego lo que muestran es el efecto de la variación de la velocidad del cabezal móvil constante a cierta temperatura.

Por ultimo los resultados se presentaran de manera de poder observar el efecto de la temperatura y la velocidad de cabezal móvil sobre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo a carga máxima.

En las figuras presentadas a continuación, podemos observar el comportamiento general del acero inoxidable AISI 316L, a una velocidad de cabezal móvil constante (1, 10 y 100 mm/min respectivamente) y diferentes temperaturas (25°C, 0°C, -10°C, -30°C, -50°C, -70°C, -100°C), presentando de manera general un cambio en el comportamiento del material al disminuir la temperatura y al aumentar la velocidad de cabezal móvil.

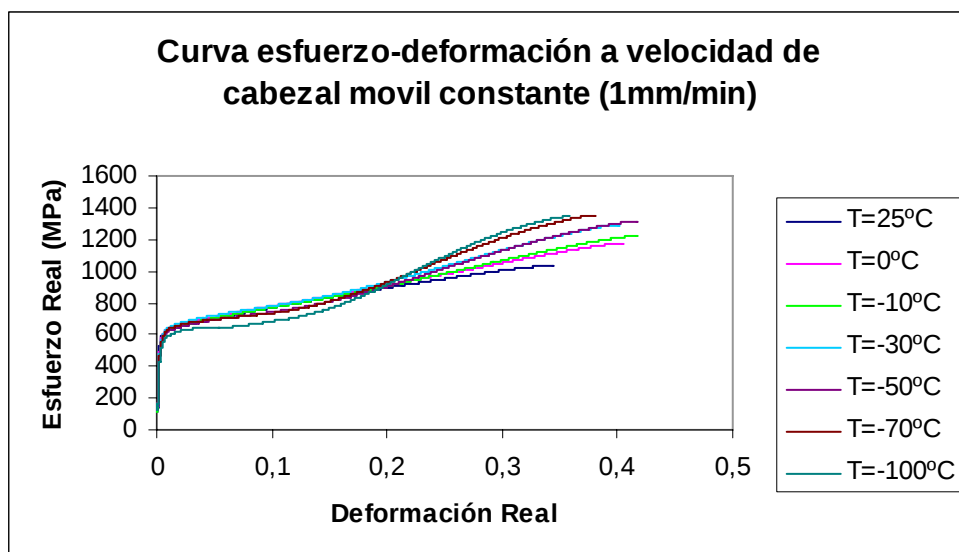


Figura 3.1 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (1mm/min).

Como se puede observar en la gráfica mostrada anteriormente (Figura 3.1), existe una variación sistemática clara que define el comportamiento de las curvas de esfuerzo - deformación para el acero 316L ensayado a una velocidad de cabezal de 1 mm/min a diferentes temperaturas. Presentando un aumento en la resistencia a la tracción a medida que la temperatura de ensayo tiende a disminuir. La mayor diferencia de los resultados se puede observar en el comportamiento de la ductilidad del material, ya que esta varía aleatoriamente para el esfuerzo a carga máxima, a medida que la temperatura de ensayo disminuye.

También se puede apreciar que existe una ligera disminución del esfuerzo en el inicio de la región de endurecimiento por deformación para las temperaturas de -70°C y -100°C. Este comportamiento se puede atribuir principalmente a la activación de la transformación de la fase austenítica a martensítica tal como lo describe Nishimura et al.⁽²²⁾

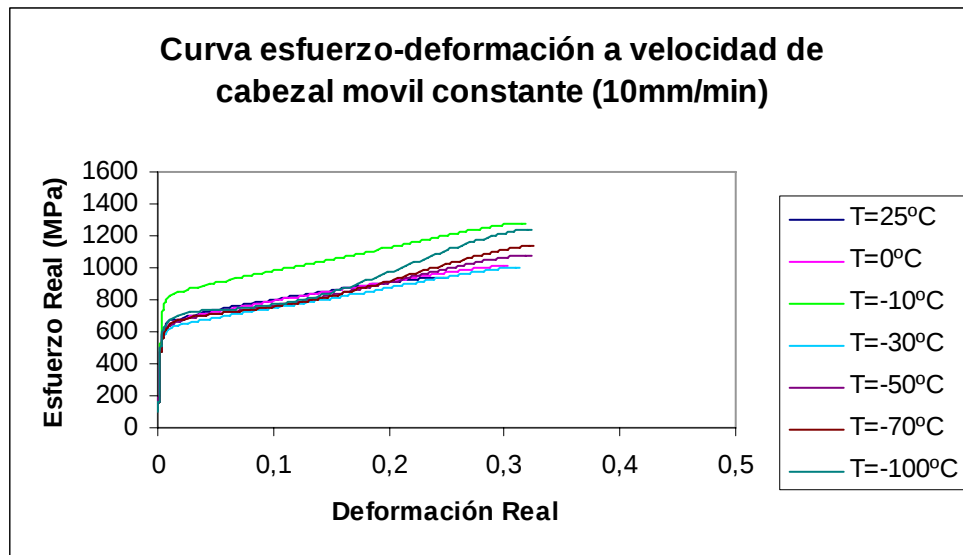


Figura 3.2 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (10mm/min).

La Figura 3.2 muestra a igual que la grafica anterior, un incremento en la resistencia a la tracción a medida que disminuye la temperatura. Tambien se puede observar dentro de este comportamiento, es el incremento excesivo para la muestra ensayada a -10°C en comparación con el resto de las curvas. Aunque en esta oportunidad los ensayos se realizaron a 10 mm/min se mantiene la disminución del esfuerzo para el inicio de la zona de endurecimiento por deformación para las temperaturas de -70°C y -100°C.

En este caso, aparentemente la velocidad del cabezal (de 10 mm/min) tuvo una influencia en el comportamiento dúctil del material y es, que esta aumenta ligeramente a medida que disminuye la temperatura.

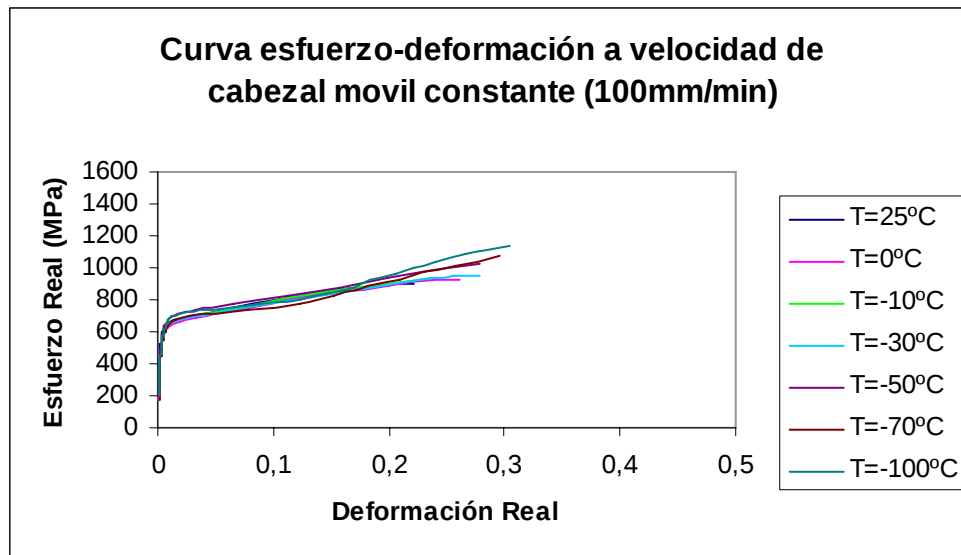


Figura 3.3 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (100mm/min).

En la Figura 3.3, el material al disminuir la temperatura tiene un comportamiento muy similar al presentado en la Figura 3.2, En esta oportunidad se puede observar claramente como hay un aumento de la ductilidad del material a medida que disminuye la temperatura para una velocidad de cabezal de 100 mm/min. También se mantiene el comportamiento antes descrito por Nishimura et al.⁽²²⁾, observándose que a medida que la velocidad del cabezal aumenta, pareciera que este fenómeno de disminución del esfuerzo para la temperatura de -100°C tiende a desaparecer.

De las figuras anteriores, se puede decir que la velocidad del cabezal juega un papel importante en el comportamiento plástico del material, este comportamiento también es altamente influenciado por la temperatura de ensayo, ya que ambos limitan la deformación plástica y la transformación de fases.

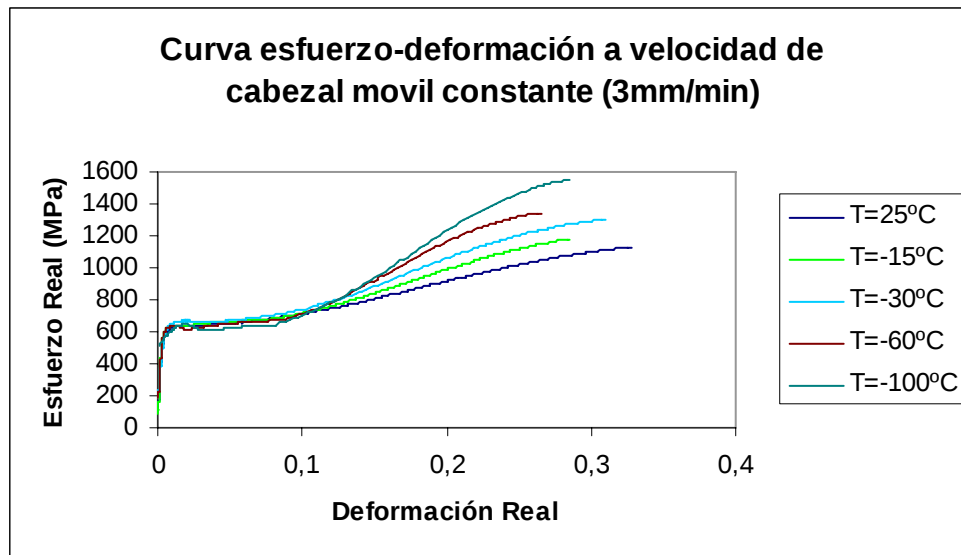


Figura 3.4 Curva esfuerzo-deformación a velocidad de cabezal móvil constante (3mm/min).⁽²⁵⁾

Como se puede observar en la Figura 3.4, existe una variación sistemática clara que defina el comportamiento de las curvas de esfuerzo - deformación para el acero 316L ensayado a una velocidad de cabezal de 3 mm/min a diferentes temperaturas. Presentando un aumento en la resistencia a la tracción a medida que la temperatura de ensayo tiende a disminuir. La mayor diferencia de los resultados se puede observar en el comportamiento de la ductilidad del material, ya que esta varía aleatoriamente para el esfuerzo a carga máxima, a medida que la temperatura de ensayo disminuye.

A continuación, se presentarán una serie de curvas donde se podrá estudiar el efecto de la velocidad del cabezal para diferentes temperaturas.

En la Figura 3.5 se puede observar como se presenta un ligero aumento en el esfuerzo de fluencia a medida que aumenta la velocidad. Por otro lado, el comportamiento del punto de esfuerzo a carga máxima es inversamente proporcional a la variación de velocidad. Cumpliendo de manera precisa con el comportamiento esperado.

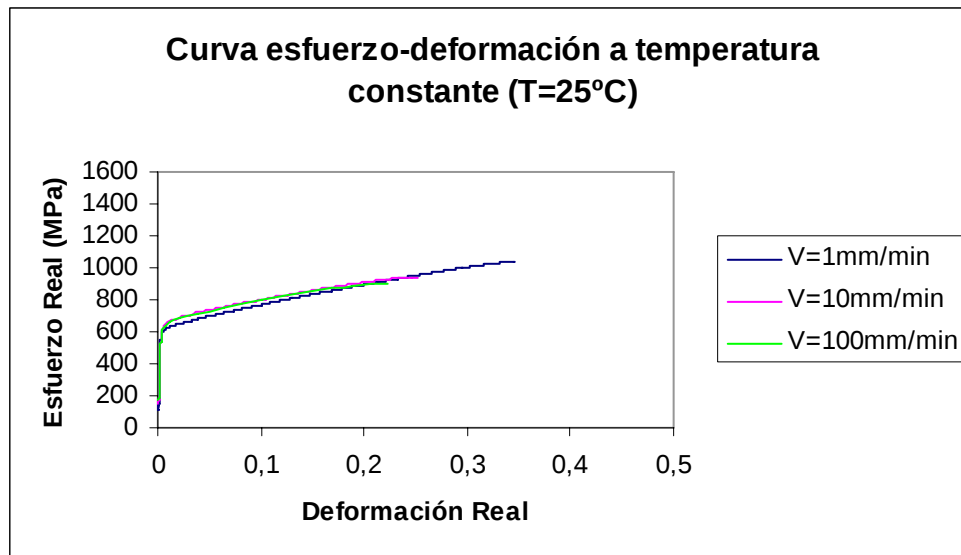


Figura 3.5 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (25°C).

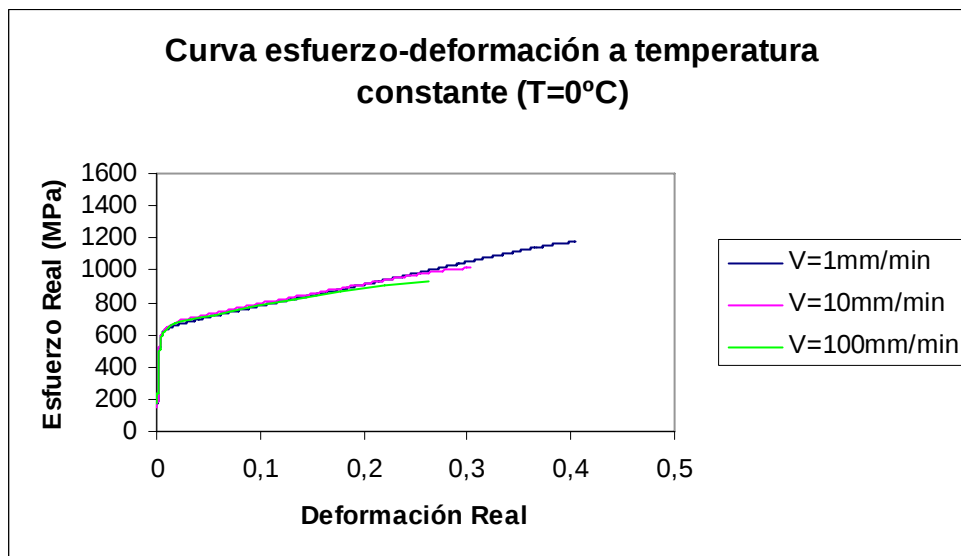


Figura 3.6 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (0°C).

En la Figura 3.6 se observa un comportamiento similar al observado en la Figura 3.6, mostrando un patrón definido de variación de las propiedades mecánicas del material.

Como se puede observar en la Figura 3.7 durante el ensayo realizado a una velocidad de cabezal móvil constante igual de 10mm/min, el material presento un comportamiento anómalo, este comportamiento se encuentra por completo fuera del típico presentado por las demás probetas, que cumplen con la tendencia esperada, (disminuyendo su esfuerzo a carga máxima al aumentar la velocidad y disminuyendo su ductilidad).

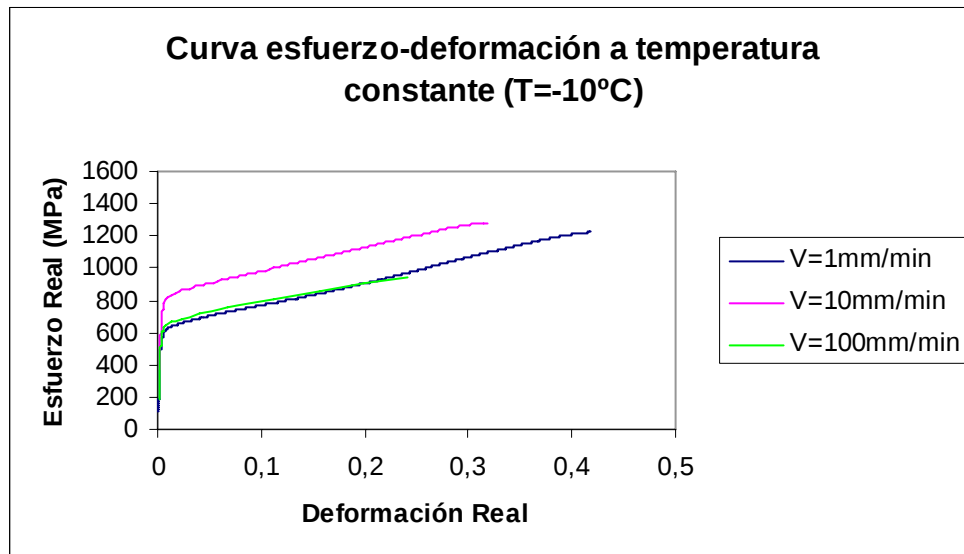


Figura 3.7 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-10°C).

En la Figura 3.8 seguimos observando la disminución del esfuerzo a carga máxima y deformación a medida que se incrementa la velocidad del cabezal. También se puede notar que existe un ligero cambio en el comportamiento lineal de la curva de esfuerzo-deformación para una velocidad de 1 mm/min. Esto se puede atribuir a que el coeficiente de endurecimiento por deformación se ve afectado por la disminución de la temperatura.

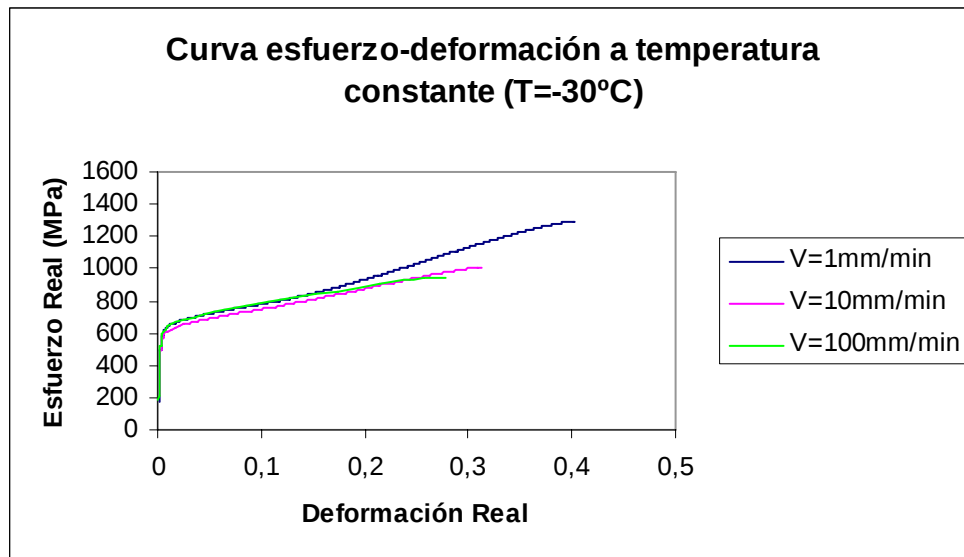


Figura 3.8 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-30°C).

En la Figura 3.9 también se observa la disminución del esfuerzo a carga máxima y deformación a medida que se incrementa la velocidad del cabezal. Así como, el efecto de variación del coeficiente de endurecimiento en esta oportunidad para las velocidades de 1 y 10 mm/min.

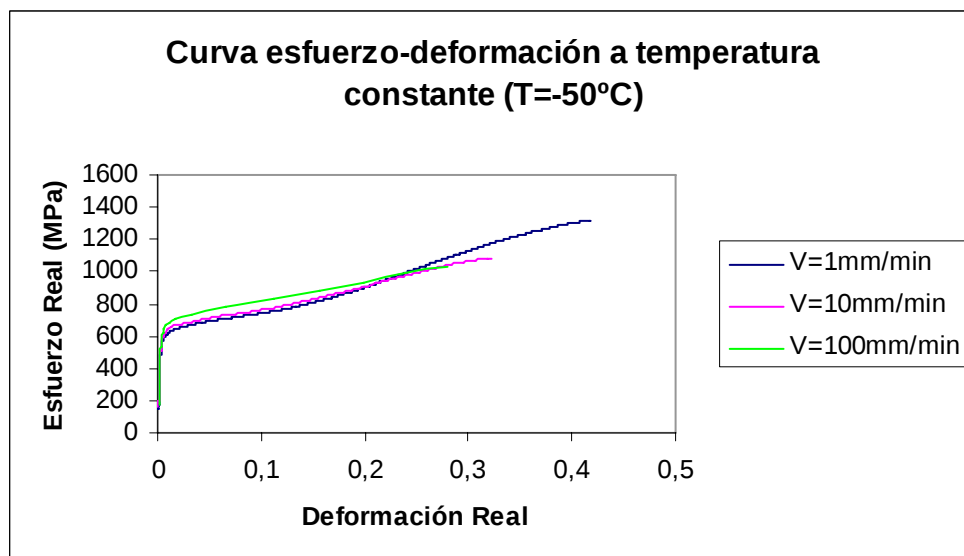


Figura 3.9 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-50°C).

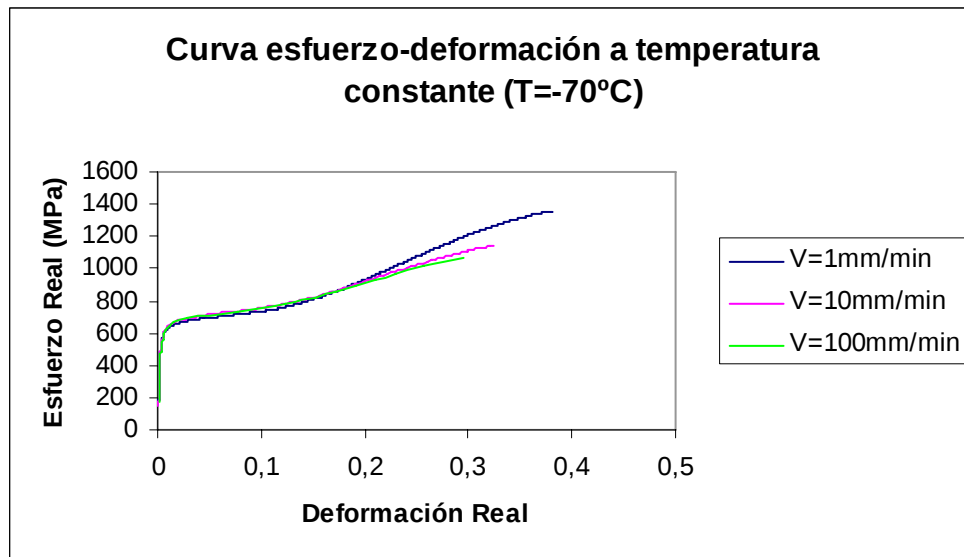


Figura 3.10 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-70°C).

En esta oportunidad (Figura 3.10), se observa claramente como las tres curvas siguen el mismo comportamiento: disminución de la deformación con la velocidad del cabezal y ligera variación del coeficiente de endurecimiento por deformación.

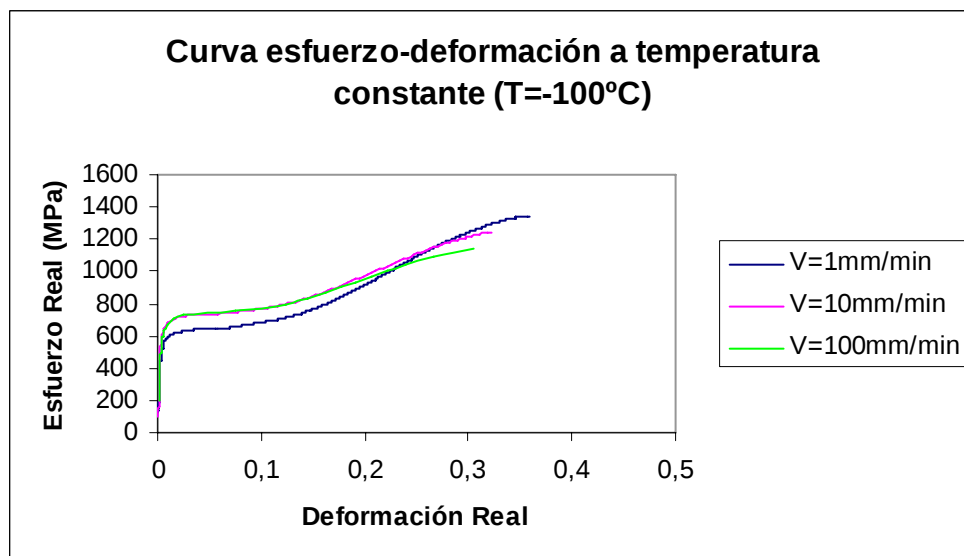


Figura 3.11 Curva esfuerzo-deformación a temperatura constante (-100°C).

La Figura 3.11, describe el comportamiento señalado en la Figura 3.10. Solo se debe tomar en cuenta una variación en el inicio de zona de deformación plástica, donde el esfuerzo es menor para la velocidad de 1 mm/min.

Como se puede observar en las figuras anteriores la disminución de la temperatura tiene como efecto aumentar la ductilidad para la mayor velocidad del cabezal y disminuir la ductilidad para la velocidad de cabezal menor. También se puede observar, que a medida que disminuye la temperatura la resistencia a la tracción tiende a incrementarse.

Tabla 3.1 Valores del esfuerzo de fluencia y esfuerzo a carga máxima para diferentes temperaturas y diferentes velocidades de cabezal móvil constante.

Velocidad de cabezal (mm/min)	Temperatura (°C)	25	0	-10	-30	-50	-70	-100
1	σ_y (MPa)	597,5	593,9	572,1	590,3	565,0	572,7	526,9
	σ_{uts} (MPa)	1035,6	1173,4	1222,2	1290,1	1312,8	1352,0	1344,1
10	σ_y (MPa)	621,6	608,1	783,2	565,7	592,6	575,1	618,0
	σ_{uts} (MPa)	943,2	1012,1	1279,2	1006,1	1080,6	1137,1	1241,4
100	σ_y (MPa)	621,0	583,5	601,1	597,8	623,4	558,4	591,3
	σ_{uts} (MPa)	893,9	925,8	940,1	948,7	1029,3	1069,6	1142,6

Los valores reportados en la tabla anterior permiten conocer que no existe una variación sistemática de los resultados en función a la temperatura o velocidad de cabezal, tanto para el esfuerzo de fluencia como para la resistencia a la tracción.

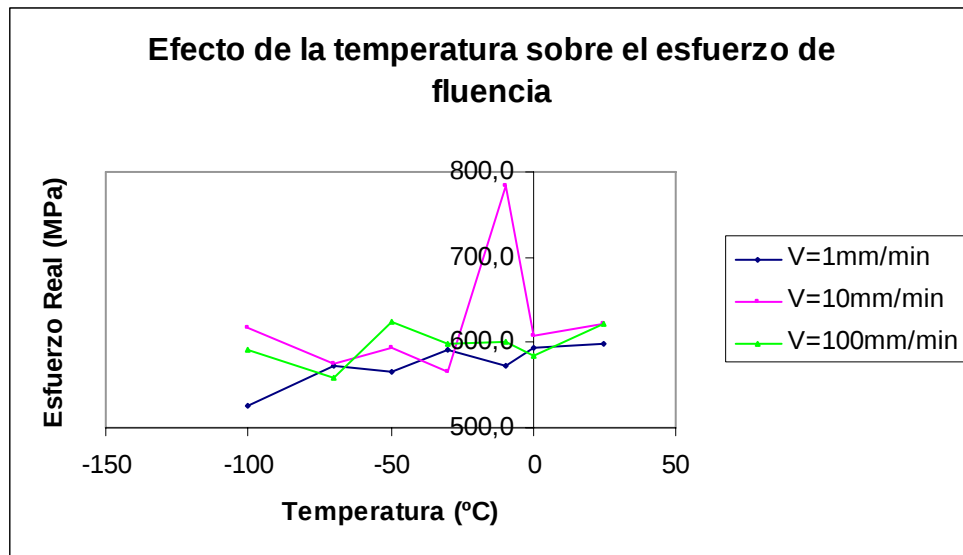


Figura 3.12 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia.

En esta figura (Figura 3.12) se pudo observar como el esfuerzo de fluencia es débilmente afectado por la velocidad de cabezal y por la temperatura del ensayo. Al no apreciarse una diferencia significativa de los valores de fluencia.

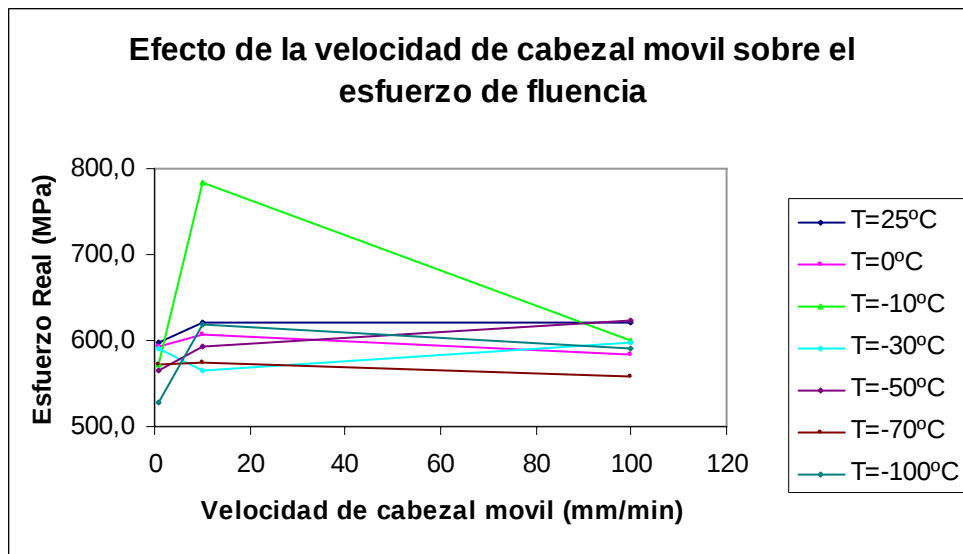


Figura 3.13 Efecto de la velocidad de cabezal móvil sobre el esfuerzo de fluencia.

En la Figura 3.13 se observa nuevamente como el valor de esfuerzo de fluencia no varía sistemáticamente en función de la temperatura y velocidad del cabezal. Así como la variación poco significativa de los valores.

Se puede apreciar en la Figura 3.14 como el esfuerzo a carga máxima tiende a aumentar a medida que la temperatura es menor y presenta una clara tendencia de disminución a medida que la velocidad es mayor. Esta última, se ve afectado directamente proporcional en función de la disminución de la temperatura. Sin tomar en cuenta el comportamiento anómalo que se presentó durante el ensayo realizado a -10°C y a 10mm/min .

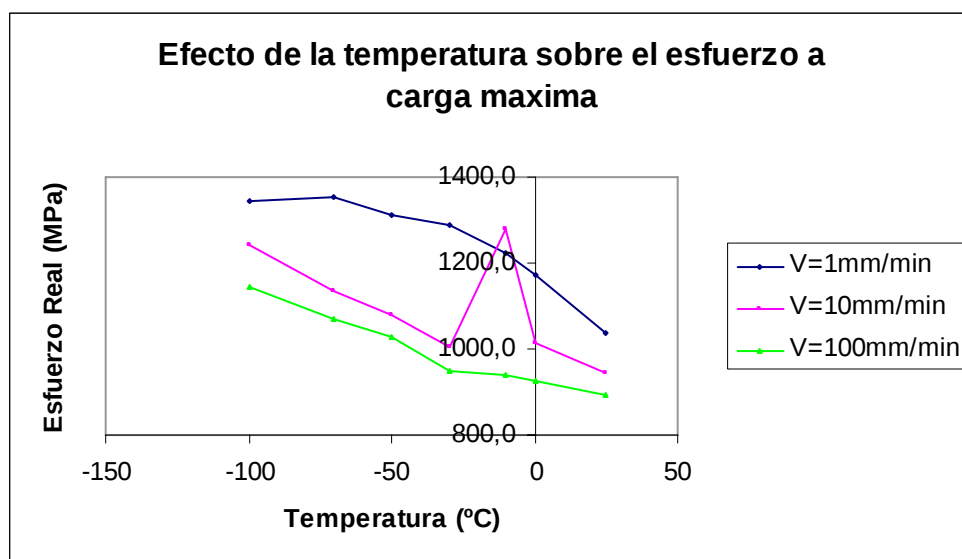


Figura 3.14 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo máximo.

En la Figura 3.15 se puede observar nuevamente como se evidencia el comportamiento anómalo de la probeta ensayada a -10°C y 10mm/min , de igual manera se observa una tendencia clara en el material de aumentar el valor del esfuerzo a carga máxima al disminuir la temperatura y la velocidad de cabezal móvil.

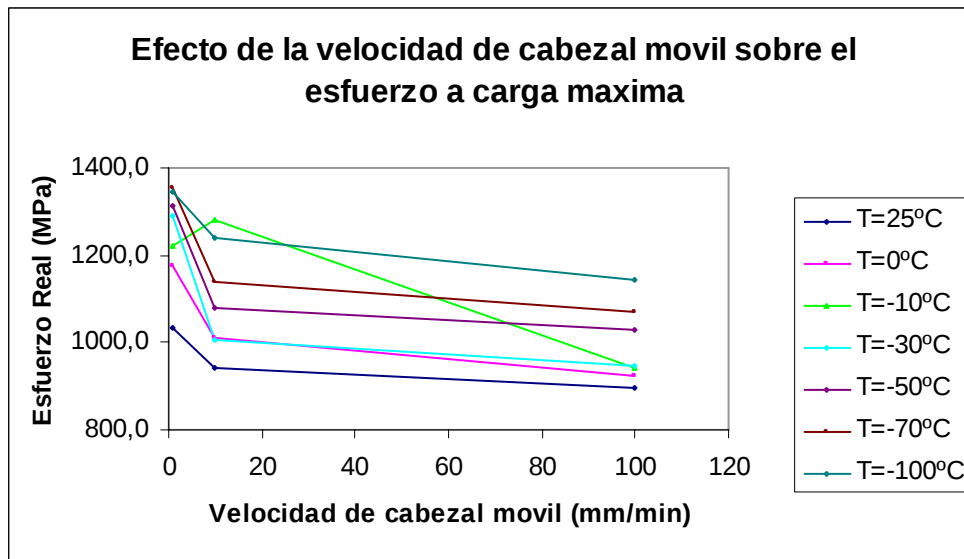


Figura 3.15 Efecto de la velocidad de cabezal móvil sobre el esfuerzo máximo.

3.2 ESTUDIO FRACTOGRAFICO.

El estudio fractográfico se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido, ubicado en el departamento de materiales, de la escuela de ingeniería industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña. Los resultados de este estudio fueron clasificados y presentados de acuerdo a su temperatura de ensayo y a la velocidad de cabezal móvil, para facilitar así su análisis y poder estudiar la influencia de cada uno de estos factores en el mecanismo de fractura del material.

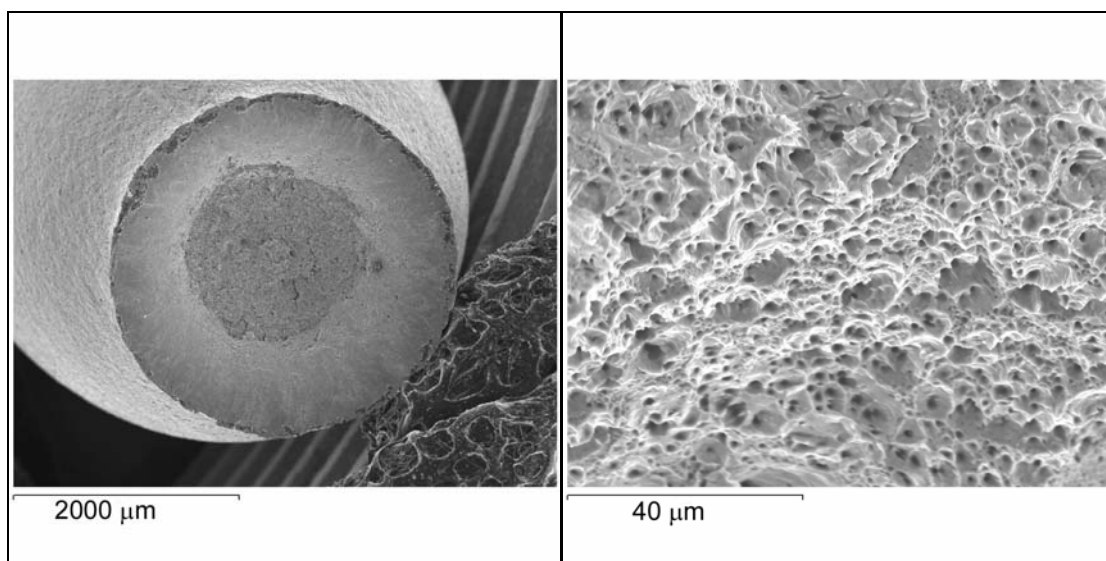


Figura 3.16 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

Como se puede observar en la Figura 3.16 la superficie de fractura indica que se presenta una fractura dúctil, ya que si se observa la parte central de la probeta esta tiene un aspecto fibroso muy característico que identifica claramente el modo de fallo. Si se observa más de cerca este aspecto fibroso lo producen los microhoyuelos, que se presentan con la coalescencia de microcavidades que tienen inicio en los alrededores de inclusiones, partículas o discontinuidades que originan una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica.

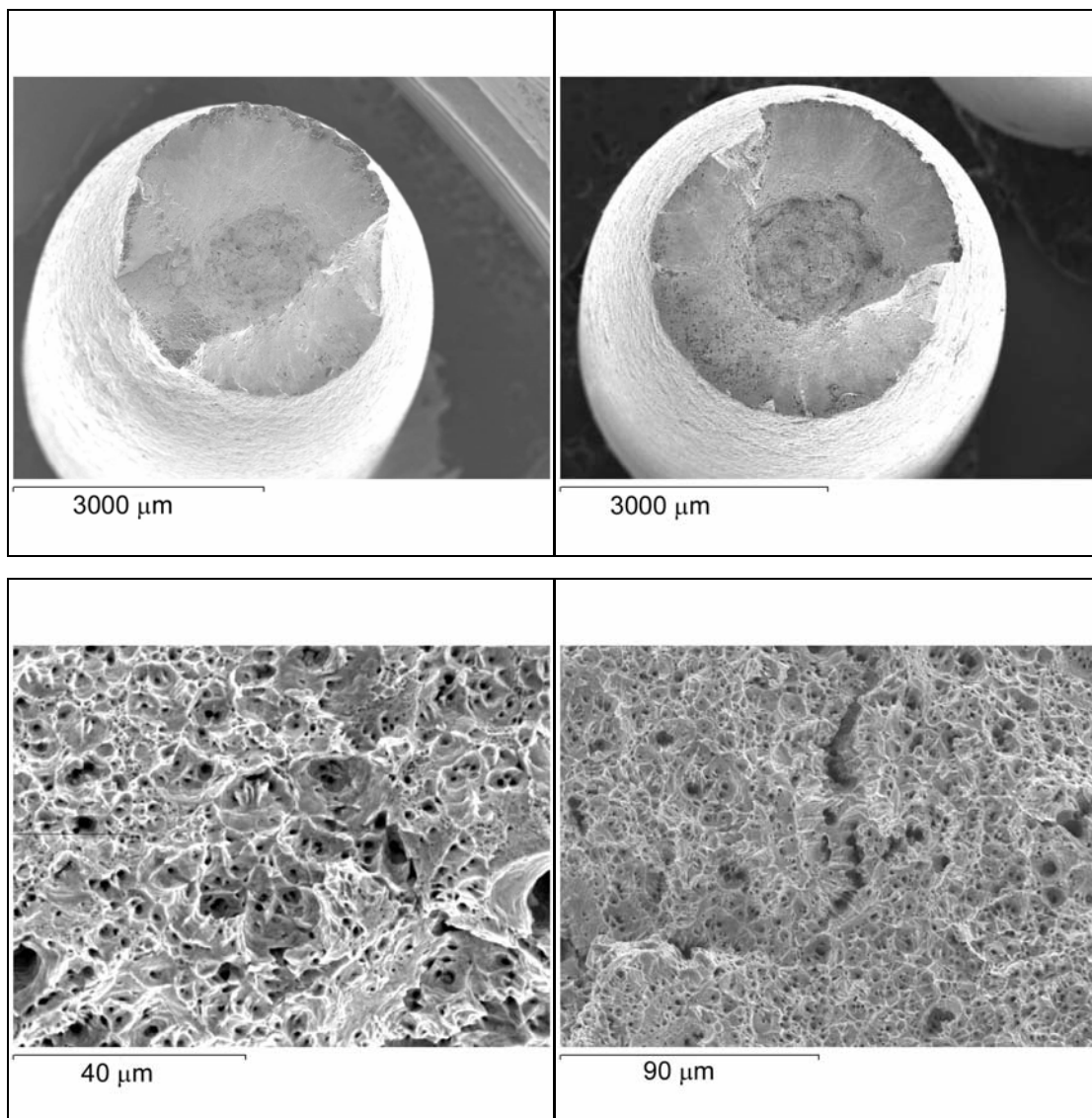


Figura 3.17 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

En esta (Figura 3.17), se puede observar claramente la presencia de una fractura tipo copa y cono, se puede ver la presencia de microcavidades en el interior de la sección de la probeta, al formarse estas microcavidades estas van creciendo (por coalescencia de microcavidades), hasta que se produce la falla, cuando la sección transversal de la probeta no soporta la carga y se fractura de manera rápida por propagación de la grieta alrededor del perímetro del área de desgarramiento de fractura.

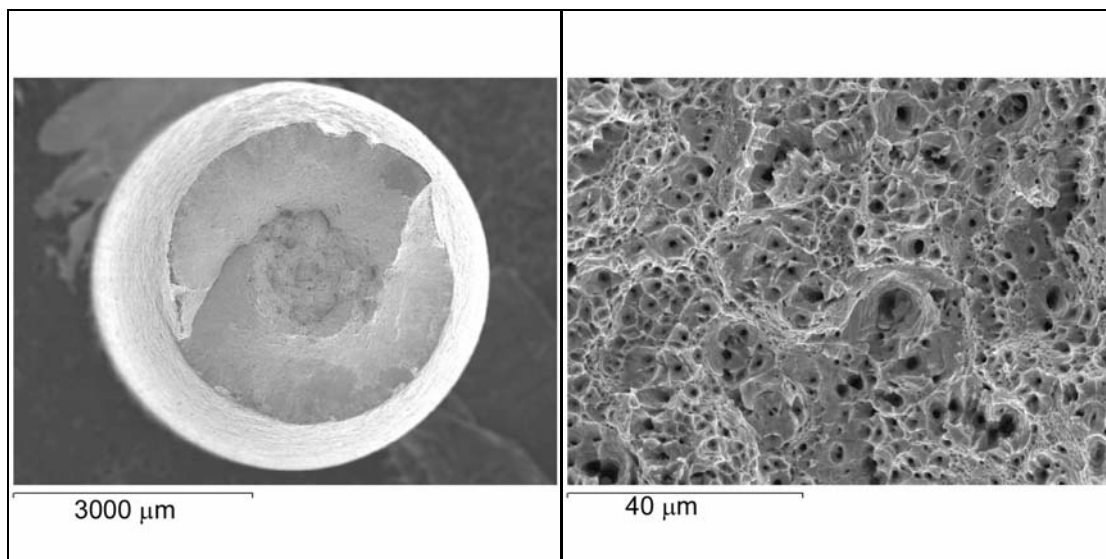


Figura 3.18 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 25°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

En la Figura 3.18 se aprecia nuevamente el mecanismo de fractura tipo copa y cono, la existencia de una zona de desgarre plástico, y de estricción, si observamos de cerca encontraremos la presencia de microhoyuelos característicos de una fractura dúctil.

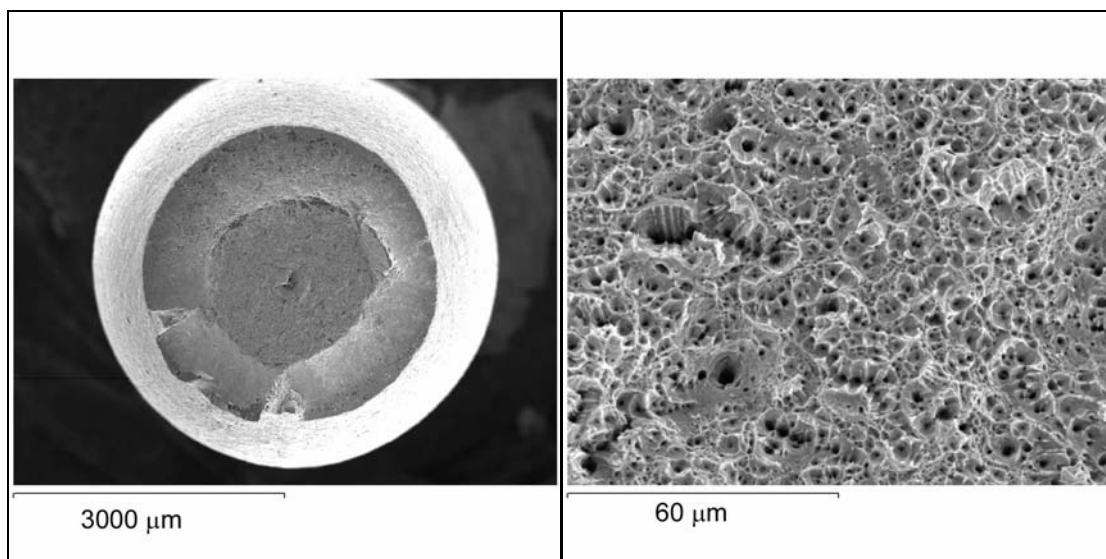


Figura 3.19 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

Como se puede observar en la figura a continuación (Figura 3.19), hay presencia de fractura dúctil, ya que se observa una zona de desgarre plástico, y la presencia de microcavidades.

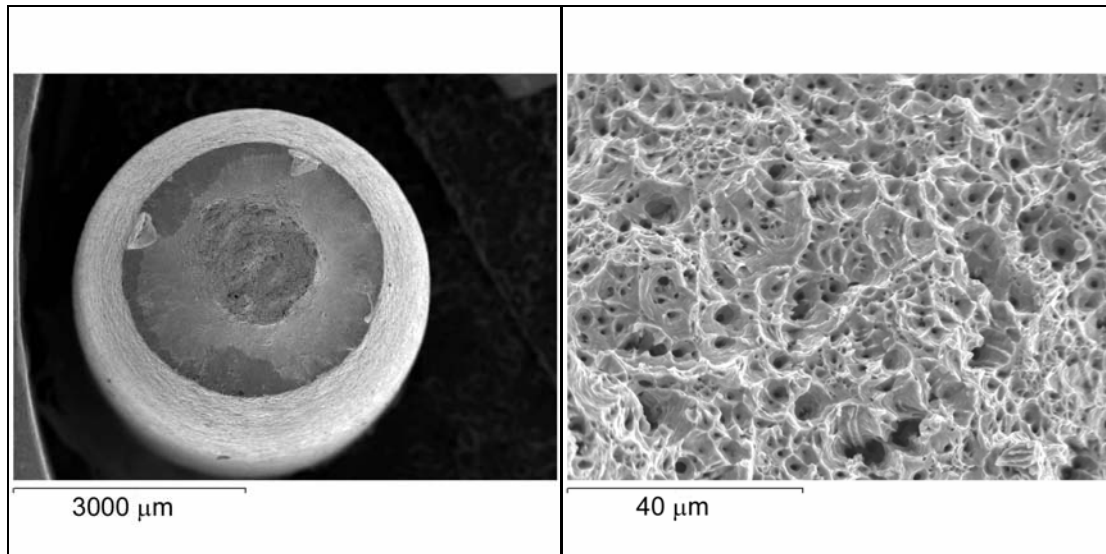


Figura 3.20 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

En la figura anterior (Figura 3.20), se observa un incremento en el tamaño de los microhoyuelos, aunque si observamos una disminución en el área de la zona de estricción.

En la Figura 3.21 es posible observar la presencia de la zona de estricción y la presencia de microcavidades, características claras de la presencia de una fractura dúctil.

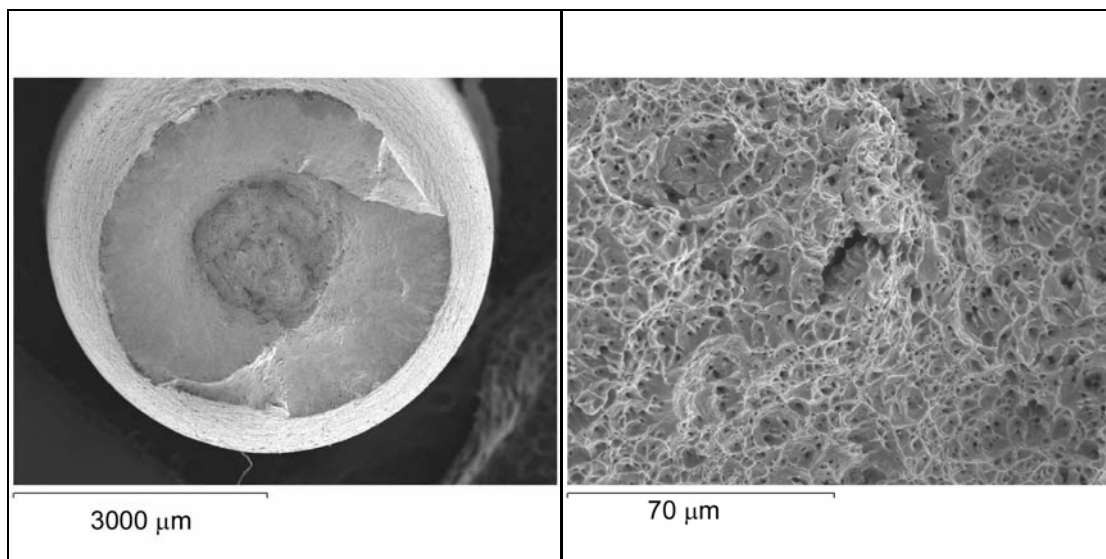


Figura 3.21 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a 0°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

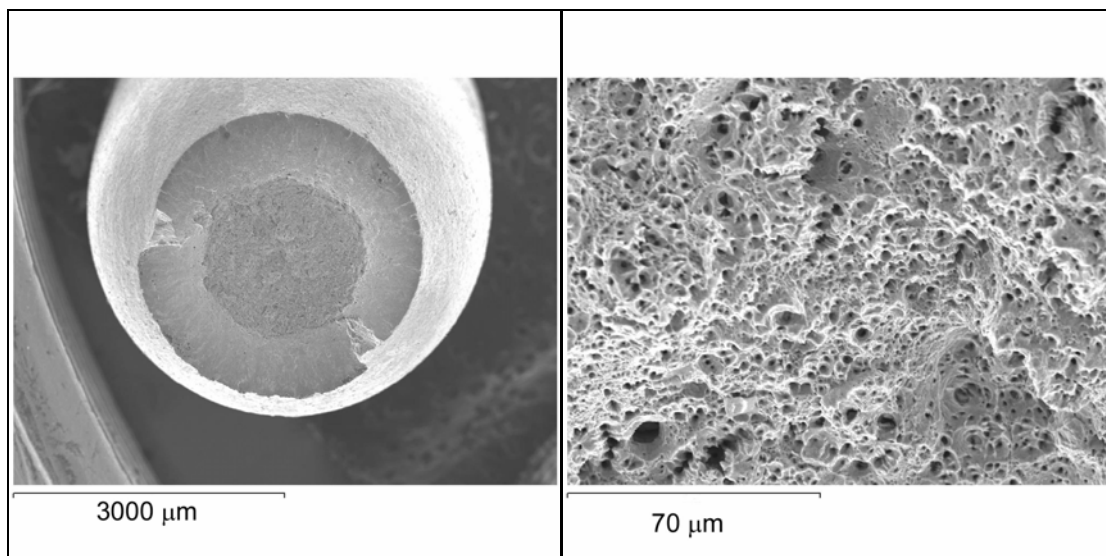


Figura 3.22 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

Se puede observar en la Figura 3.22 un crecimiento de la zona de estricción, al igual que la presencia de microcavidades, así como también es posible apreciar la fractura de tipo copa y cono, característico de una fractura dúctil.

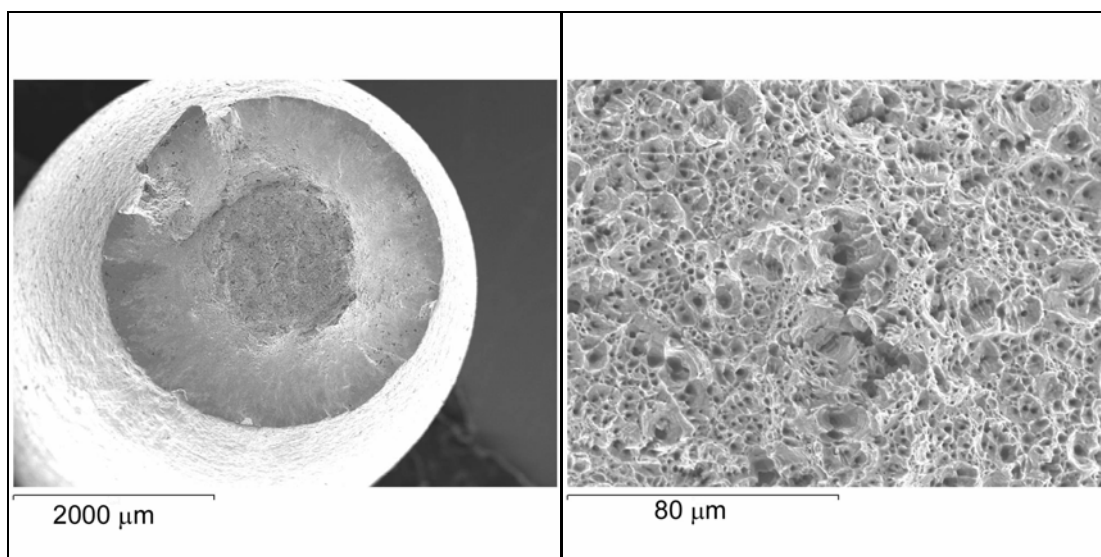


Figura 3.23 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

En la Figura 3.23 se aprecia como se mantiene la fractura dúctil de tipo copa y cono en el material, de igual manera se observa la zona de desgarramiento plástico, también se pueden observar los microhoyuelos, característicos de una fractura dúctil.

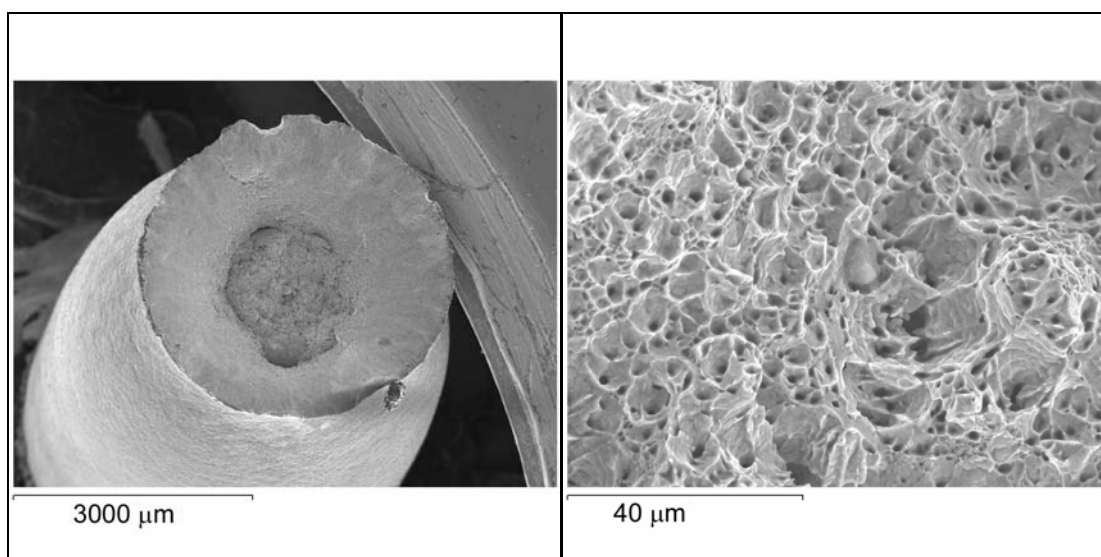


Figura 3.24 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -10°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

La Figura 3.24 muestra claramente el tipo de fractura copa y cono, se puede observar la presencia de la zona de estricción, y al observar mas de cerca, la presencia de microhoyuelos, característico de una fractura dúctil.

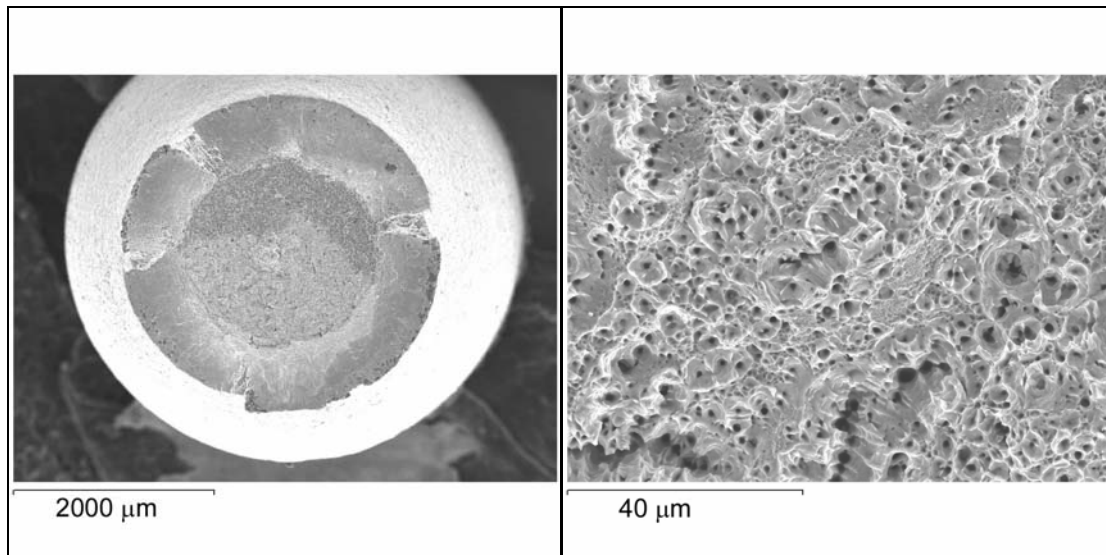


Figura 3.25 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

Se puede observar en la figura anterior (Figura 3.25) como existe una fractura dúctil, ya que se observa la zona de desgarramiento plástico y un marcado comportamiento de fractura tipo copa y cono, de igual manera se observa la presencia de microcavidades.

Esta figura (Figura 3.26) muestra una fractura dúctil, ya que se observo la presencia de una zona de desgarramiento plástico, así como también la presencia de microhoyuelos.

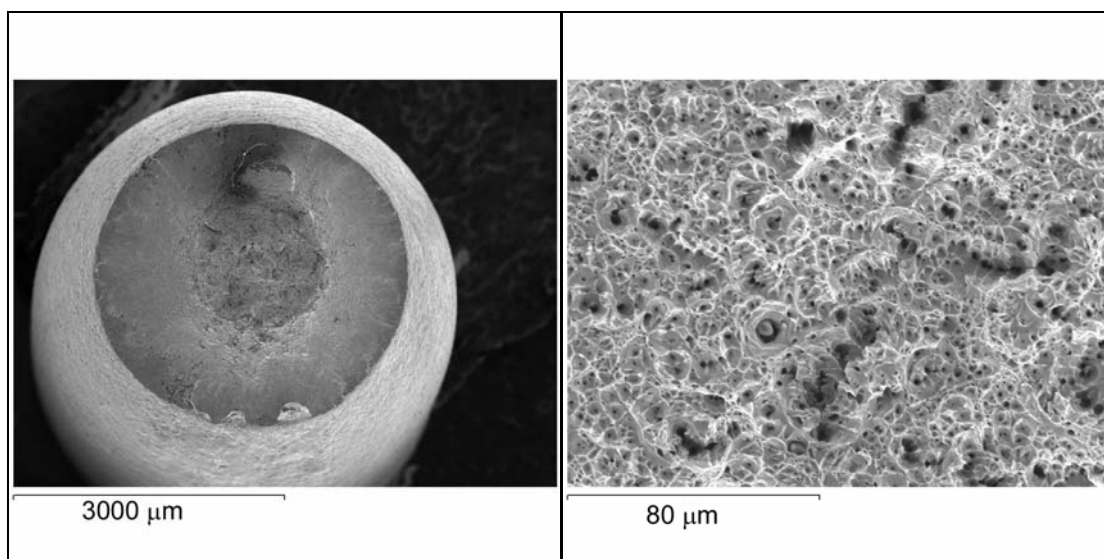


Figura 3.26 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

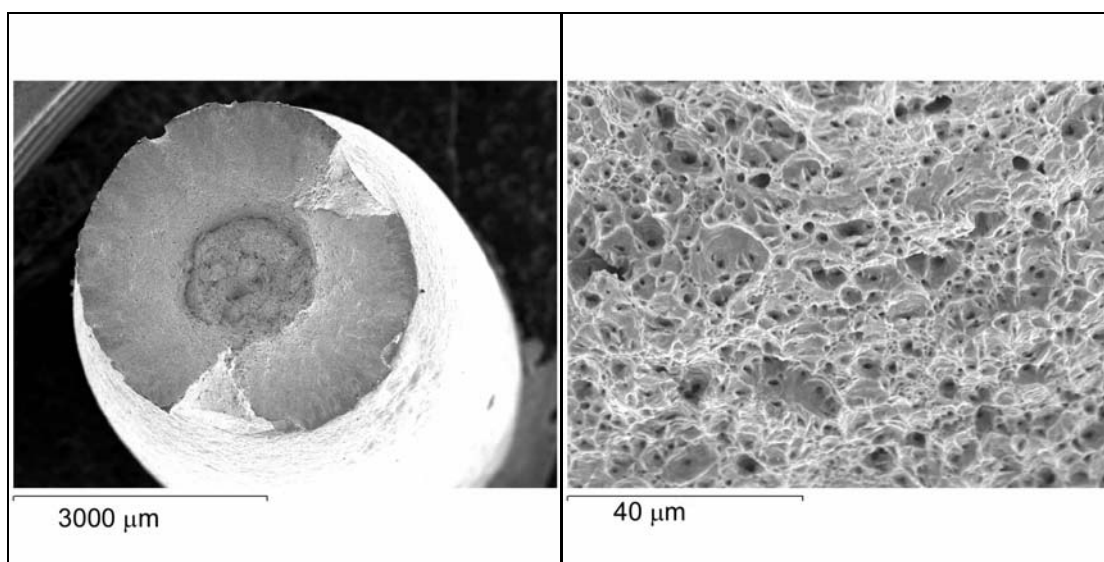


Figura 3.27 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -30°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

Como se puede apreciar en la Figura 3.27 se sigue presentando el comportamiento típico presentado por el material, ya que el material presenta una

fractura de tipo dúctil, a pesar de la variación de la temperatura y el aumento de la velocidad de cabezal móvil.

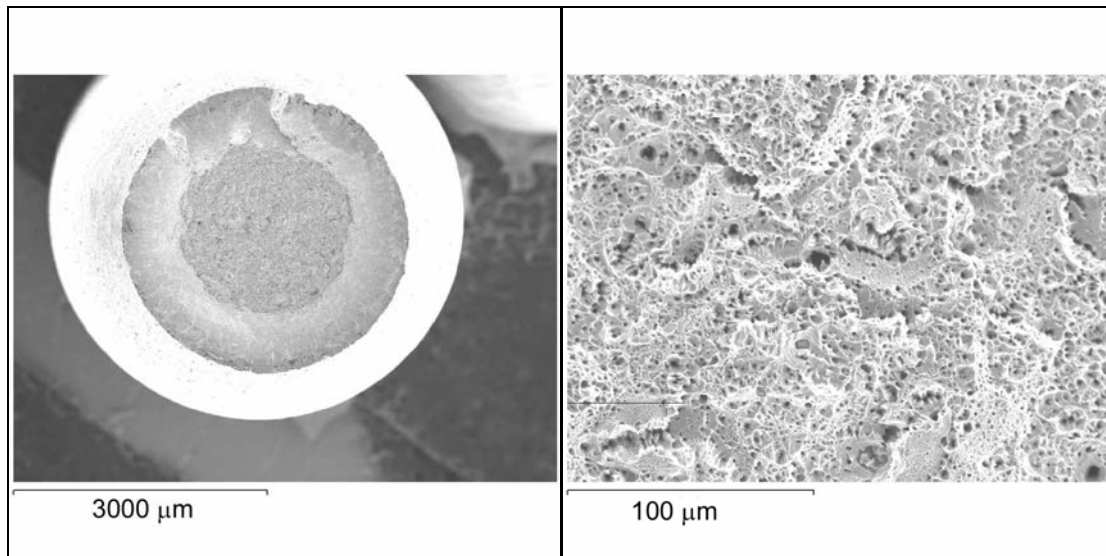


Figura 3.28 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

En la figura anterior (Figura 3.28) se puede observar la presencia de microcavidades y una zona de desgarramiento plástico.

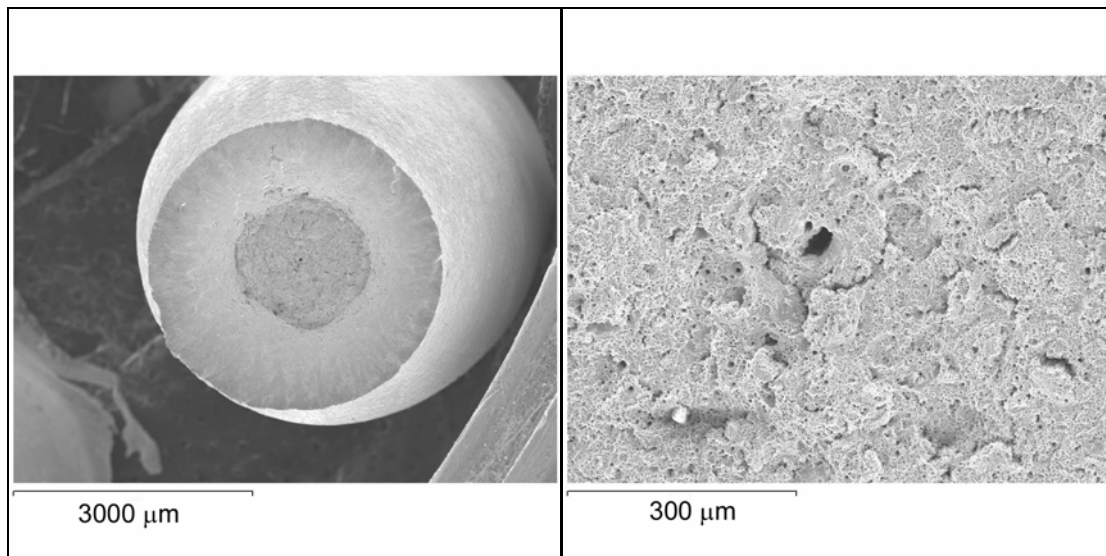


Figura 3.29 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

En la Figura 3.29 se puede observar como se cumple nuevamente el comportamiento descrito anteriormente, y se aprecia una zona de desgarre plástico y microcavidades.

En la siguiente figura (Figura 3.30) se observa como el comportamiento antes descrito se repite nuevamente, la presencia de una fractura dúctil, evidenciada en una zona de desgarre plástico y la presencia de microcavidades.

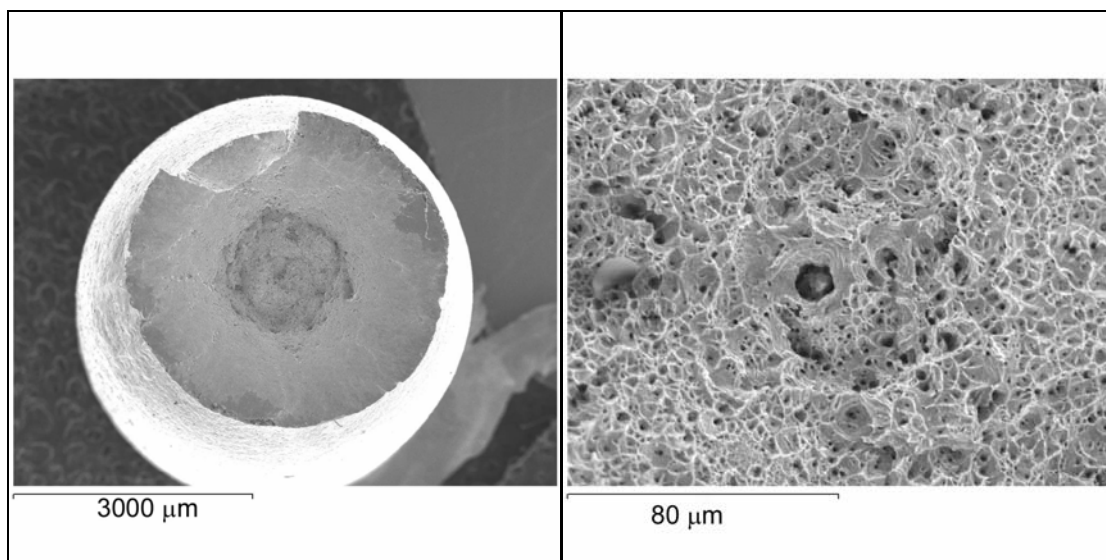


Figura 3.30 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -50°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

En la Figura 3.31 se puede observar como el tipo de fractura del material es dúctil, debido a la presencia de una zona de estricción, y de microcavidades.

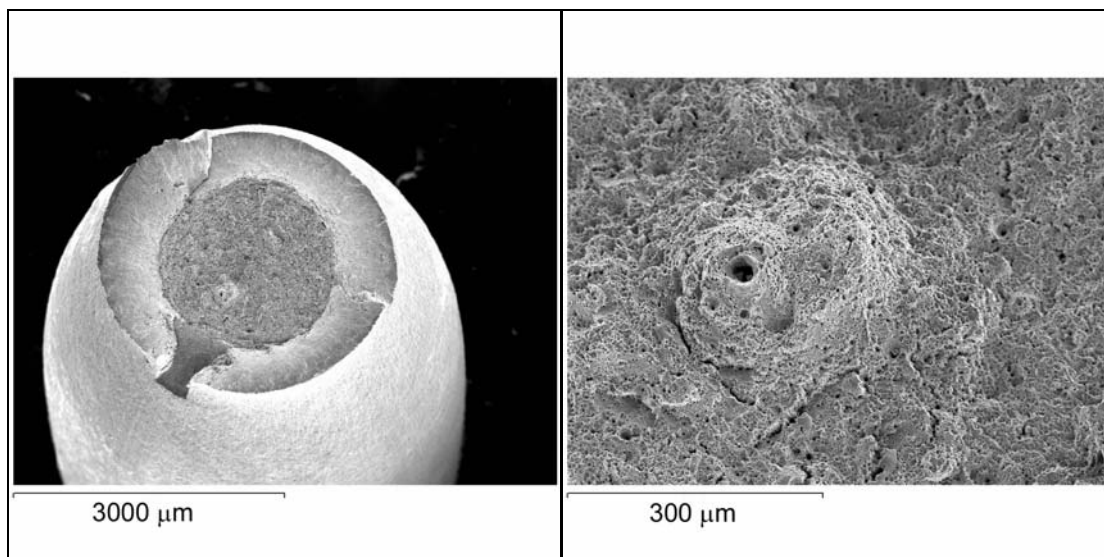


Figura 3.31 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

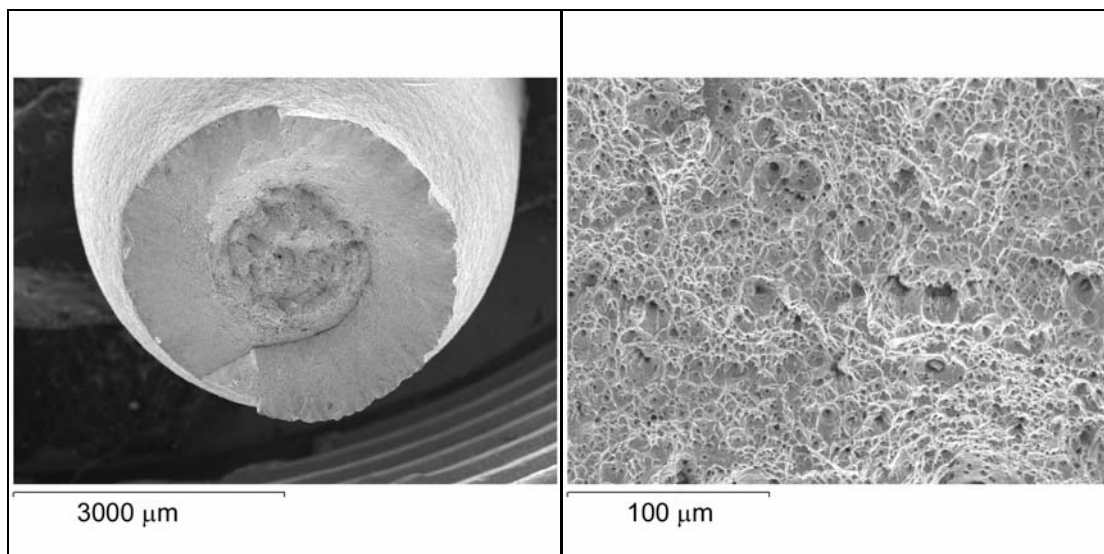


Figura 3.32 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

La Figura 3.32 muestra la zona de desgarramiento plástico, y los microhoyuelos, característica clara de una fractura dúctil.

En la Figura 3.33 se puede observar claramente como hay una zona de desgarramiento plástico, evidencia de una fractura del tipo dúctil.

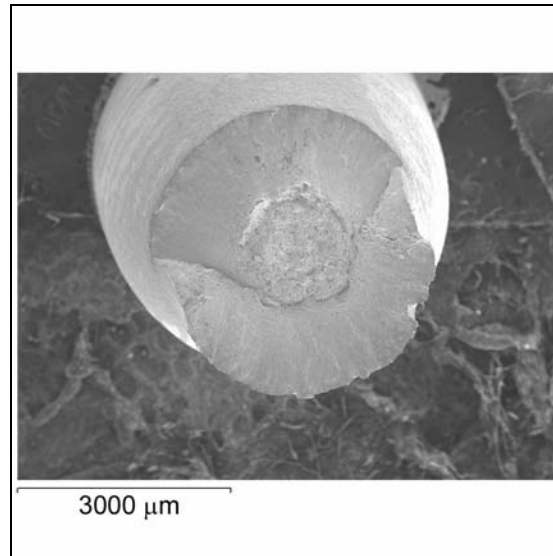


Figura 3.33 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -70°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

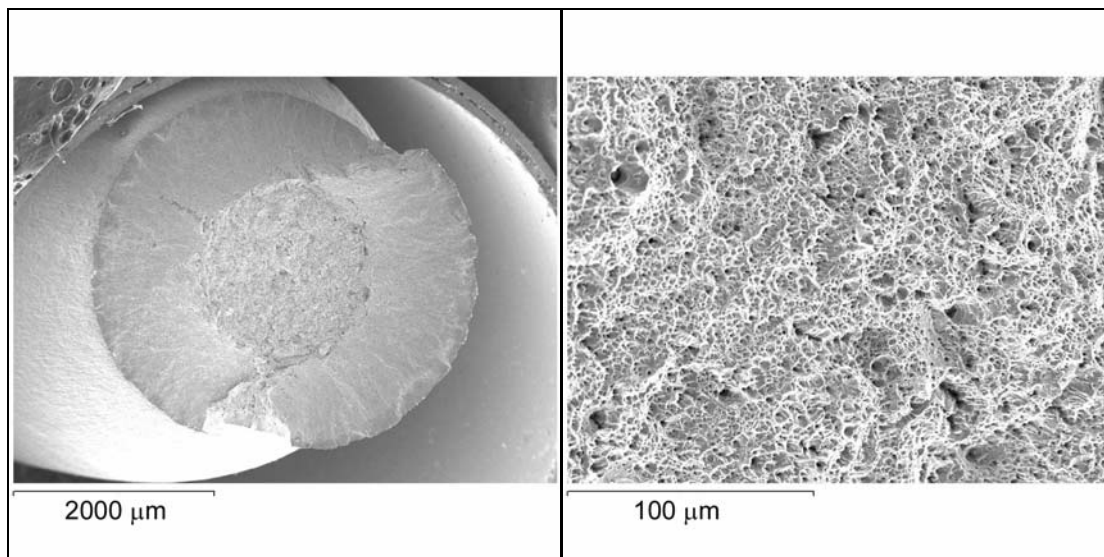


Figura 3.34 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 1mm/min.

La Figura 3.34 muestra una superficie de fractura completamente dúctil, donde se puede apreciar una zona fibrosa, con presencia de microcavidades.

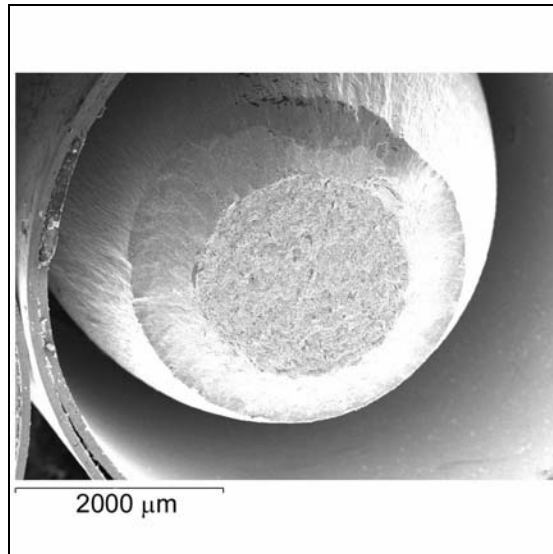


Figura 3.35 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 10mm/min.

En la Figura 3.35 se puede observar claramente el tipo de fractura dúctil de copa y cono, también podemos observar una zona de desgarramiento plástico.

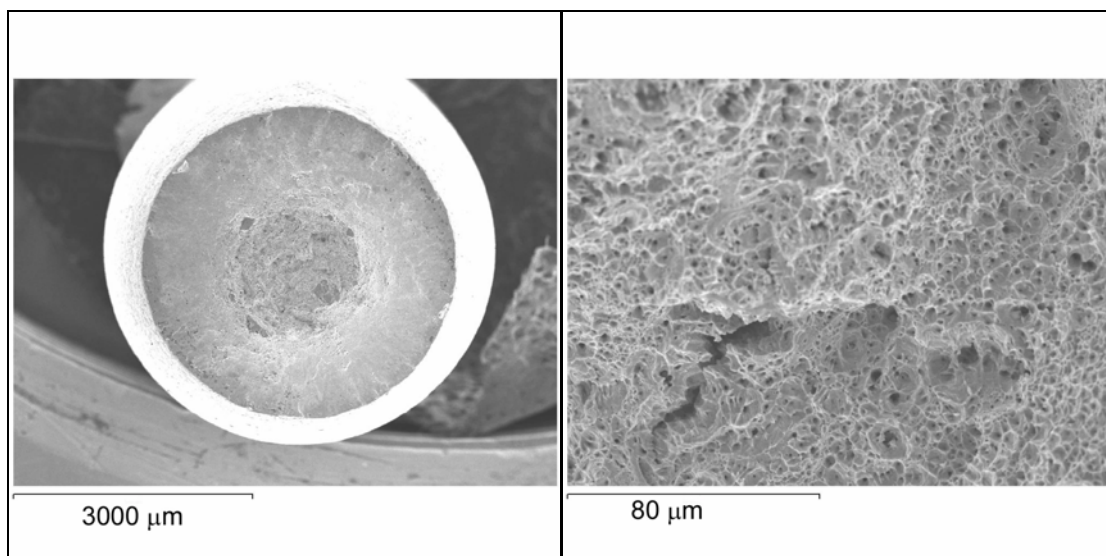


Figura 3.36 Superficie de fractura de probeta ensayada a temperatura igual a -100°C y velocidad de cabezal móvil 100mm/min.

En esta figura (Figura 3.36) se observa claramente la zona de desgarramiento plástico y los microhoyuelos, evidencia de una fractura dúctil.

De los resultados obtenidos se puede decir que durante el material no posee una temperatura de transición de dúctil a frágil y presenta una fractura dúctil a lo largo de todo el intervalo de temperaturas de ensayo, evidenciada con la presencia de una zona de desgarre plástico y microcavidades.

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1 CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos de los ensayos de tracción uniaxial realizados a probetas de acero inoxidable AISI 316L, en un amplio espectro de temperaturas por debajo de 0°C, en condiciones de velocidad de cabezal móvil constante y temperatura constante, se puede concluir:

- Para este acero el valor del esfuerzo de fluencia es débilmente afectado por la velocidad de cabezal móvil y la temperatura de ensayo, presentando una ligera disminución, aunque no de manera significativa, al disminuir la temperatura de ensayo.
- Otro comportamiento evidenciable del análisis de las curvas es el relacionado con la disminución de la ductilidad a medida que se aumenta la velocidad de cabezal.
- Se observa que el Esfuerzo real a carga máxima tiende a aumentar al disminuir la temperatura de ensayo.
- Por otra parte, el Esfuerzo real a carga máxima, presenta una tendencia a disminuir a medida que aumenta la velocidad del cabezal.
- Ciertos procesos tienen lugar durante los ensayos que nos permiten entender mejor el comportamiento del material, de estos el que nos concierne a nosotros es el cambio de fase de austenita a martensita, que afecta las curvas, que experimentan una variación en la tasa de endurecimiento por deformación, y este efecto tiende claramente a desaparecer cuando incrementa la velocidad de cabezal móvil.

4.2 RECOMENDACIONES.

Estas recomendaciones son hechas con el único objetivo de orientar futuros trabajos que sean realizados para completar el presente estudio:

- Realizar trabajos similares, donde cada ensayo sea realizado por duplicado o triplicado para poder estudiar de esta manera la reproducibilidad de los resultados.
- Realizar trabajos similares donde se incorporen otras aleaciones para llevar a cabo una comparación entre todos los resultados.
- Realizar trabajos similares en donde se lleven a cabo ensayos a tasa de deformación constante.
- Realizar trabajos similares a fin de hacer un análisis constitutivo del material.

CAPITULO V

5. BIBLIOGRAFIA.

5.1 BIBLIOGRAFIA.

- 1) www.key-to-Steel.com, Classification of Stainless Steels.
- 2) KOSA t. Machining of Stainless Steels, ASM Handbook, Machining, ASM, Vol. 16, USA. pp. 681-683.
- 3) DAVIS JOSEPH R., (1976) Metal Engineering Quarterly, ASM, Sourece-book on Stainless Steels, ASM, USA. pp. 45-53.
- 4) SIEWERT T.A. and McCOWAN C.N., National Institute of Standards and Technology. Welding for Cryogenic Service, ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, ASM, Vol. 6, USA. pp. 1016.
- 5) www.Key-to-Steels.com, Steels for Cryogenic and low temperature service.
- 6) GUZZONI F. (1970). Acciai Speciali e inossidabili, Gli Acciai Comuni e Speciali, Tomo 3, Roma. pp. 1043-1057.
- 7) www.Key-to-Steels.com, Steels properties at low and high temperatures.
- 8) Tension Testing, Introduction, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, ASM, Vol. 8, USA. pp. 19.
- 9) ORDOÑES S. Técnicas Experimentales en Metalurgia. Chile. pp. 24-31.
- 10) FENNER A.J. Tensile Test, Mechanical Testing of Materials, London (1965). pp 23-45.
- 11) www.Key-to-Steels.com, Resilience.
- 12) www.Key-to-Steels.com, Toughness.
- 13) DIETER G.E. Mechanical Behavior Under Tension, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, ASM, Vol. 8, USA. pp. 20-23.

- 14) DIETER G. E. The Tension Test. Mechanical Metallurgy, 1976. Second Edition. pp 329-358.
- 15) WHITTENBERGER J. (1987) Elevated/Low Temperature Tension Testing, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, ASM, Vol. 8, USA. pp. 34-37.
- 16) en.wikipedia.org, Cryogenics.
- 17) MEDVEDEV E.M. Effects of deformation and cooling conditions on low temperature plasticity of stainless iron-chromium-nickel steels, Cryogenics, Mayo 1977. pp 283-286.
- 18) CHARLES J. Nickel-free austenitic steels for cryogenic applications: the Fe-23% Mn-5% Al-0.2% C alloys, Cryogenics, Mayo 1981. pp 278-280.
- 19) READ D.T. Fracture and strength properties of selected austenitic stainless steels at cryogenic temperatures, Cryogenics, Julio 1986. pp 415-417.
- 20) OGATA T. Time-dependent deformation of austenitic stainless steels at cryogenic temperatures, Cryogenics, Junio 1986. pp 365-369.
- 21) SIEWERT T.A. Cryogenic material properties of stainless steels tube-to-flange welds, Cryogenics, Abril 1990. pp 356-364.
- 22) NISHIMURA A. Design-relevant mechanical properties of 316-type steels for superconducting magnets, Cryogenics, 1997, Volumen 37, Numero 9. pp 533-550.
- 23) SUN D. Tensile behavior of type 304 austenitic stainless steels in hydrogen atmosphere at low temperatures, Material Science and Technology, Marzo 2001, Volumen 17. pp 302-308
- 24) FREUDENBERGER J. Mechanical behavior of high nitrogen stainless steel reinforced conductor for use in pulsed high field magnets at cryogenic temperature, Cryogenics, 2003, Volumen 43. pp 133-136.
- 25) Engels Ochoa y Puchi Cabrera. Prueba para evaluar el funcionamiento de cámara criogénica, Laboratorio de Ensayos Mecánicos, UCV, 2005.

