

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO DEL ACERO ASTM  
A 572 Gr 50**

**CLAUDIA PATRICIA CARREÑO HERRERA  
MARIA CLAUDIA VILLARREAL MEJIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2006**

**CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO DEL ACERO ASTM**

**A 572 Gr 50**

**CLAUDIA PATRICIA CARREÑO HERRERA**

**MARIA CLAUDIA VILLARREAL MEJIA**

**Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar el título de Ingeniero Metalúrgico**

**Ph.D.C. M.Sc. Ing Luis Emilio Forero Gómez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2006**

## **DEDICADO**

**A Dios por ser mi amigo, mi inspirador, la fuerza que me impulso en los momentos más difíciles.**

**A mis abuelitos: Jaime Herrera y María de Herrera, por estar siempre a mi lado compartiendo mis alegrías, triunfos y derrotas.**

**A mi papá Nestor Vergara por brindarme la oportunidad de tener un padre y un gran amigo el cual me enseñó a luchar. No me cansaré de dar gracias a Dios por darme un padre ejemplar.**

**A mi mamita Faviola Herrera por inculcarme los más grandes valores y estar siempre pendiente de nosotras.**

**A mi hermana Dianita por ser mi mejor amiga, aguantarme y acompañarme en mis momentos más difíciles, a mi negrito por ser tan especial, quererme tanto y hacerme reír.**

**A mi tiito Israel gracias por escucharme, estar pendiente de mí y enseñarme a soñar.**

**A mis tíos, primos y amigos.  
Les dedico a todos uno de mis primeros sueños alcanzado.**

**Seguiré soñando y nunca desistiré de ellos.**

*Claudia Patricia Carreño Herrera*

## DEDICADO

A papá oso por enseñarme todo lo responsable y organizativo que hay en mí.

A la Barri por darle frescura, calma y desastres a mi vida.

A Hele por acolitarme mis caprichos de niña y adulta.

A Javier por enseñarme cada día que puedo ser mejor que tú.

A Totollo por las ocurrencias y los apuntes que siempre me robaban una sonrisa.

*María Claudia Villarreal Mejía*

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de esta investigación no hubiese sido posible sin la colaboración de muchas personas que con su desinteresada ayuda aportaron un granito de arena para el éxito de este proyecto.

En primer lugar, al director de este trabajo, Ingeniero Luis Emilio Forero y codirector Ingeniero Wilson Vesga.

A Acerías de Caldas por apoyar y patrocinar este proyecto, en especial al Ingeniero Orlando Plata y al ingeniero Jorge Ivan Baez.

A la escuela de Ingeniería Civil, y a la universidad Santo Tomas particularmente al Ingeniero Johann Vera.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por su imprescindible ayuda que nos han prestado durante toda nuestra etapa de formación en la universidad y en la experimentación de este trabajo.

Queremos también expresar nuestra admiración y sincera gratitud a los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por sus orientaciones e importantísimo aporte en nuestra formación profesional y humana.

A nuestros familiares por su comprensión, su apoyo inmenso, su amor y por fomentar en nosotros el deseo de superación.

A nuestros amigos Mayra, Carolina, Jose Fernando, Jhon Jairo, Jorge M, Carlos, Pedro, Milton, José Andrés, Johan, Diego, y demás amigos por brindarnos cariño y soporte.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	17
1. MARCO TEORICO	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 ACEROS MICROALEADOS FERRITO-PERLÍTICOS	20
1.2.1 Aceros microaleados al Vanadio- Niobio	21
1.3 ACERO ASTM A 572 Gr 50	22
1.3.1 Fases y microconstituyentes presentes	23
1.3.2 Determinación de la cantidad de cada fase	24
1.3.3 Tamaño de grano	25
1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS	32
1.4.1 Determinación de la resistencia a la tracción	33
1.4.2 El ensayo de tensión	33
1.4.3 El ensayo de tenacidad	36
1.4.4 El ensayo de dureza rockwell	39
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	41
2.1 EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS	41
2.1.1 Equipos	41
2.1.2 Material	46
2.2 METODOLOGIA	47
2.2.1 Preparación de muestras	48
2.2.2 Análisis	51
2.2.2 Ensayos mecánicos	51

	Pág.
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
3.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO	54
3.1.1 Fases presentes	54
3.1.2 Tamaño de grano	55
3.2 DUREZA	57
3.3 ENSAYO DE TENSION	58
3.4 ENSAYO CHARPY	61
3.4.1 Probetas Longitudinales	61
3.4.2 Probetas transversales	64
3.4.3 Análisis de Fractura	69
3.4.4 Temperatura de Transición Dúctil- Frágil.	73
4. CONCLUSIONES	81
5. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	89

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química del acero ASTM A 572 Gr. 50	22
Tabla 2. Requerimientos Tensiles	23
Tabla 3. Propiedades de los microconstituyentes de aceros Hipoeutectoides	33
Tabla 4. Nomenclatura de las probetas de acuerdo al número de colada	46
Tabla 5. Composición química del acero ASTM A 572 Gr. 50 según norma	46
Tabla 6. Porcentajes de cortante para probetas ensayadas en Charpy	53
Tabla 7. Porcentajes de fases presentes en las probetas longitudinales	54
Tabla 8. Porcentajes de fases presentes en las probetas transversales	54
Tabla 9. Tamaño de grano en las probetas longitudinales	57
Tabla 10. Tamaño de grano en las probetas transversales	57
Tabla 11. Ensayo de dureza HRA	57
Tabla 12. Propiedades tensiles de las probetas ensayadas.	59
Tabla 13. Comparación entre porcentaje de Carbono, Manganeso, Azufre Niobio y Vanadio de las probetas ensayadas	62
Tabla 14. Energía absorbida a distintas temperaturas por las probetas Longitudinales.	63
Tabla 15. Energía absorbida a distintas temperaturas por las probetas Transversales.	65
Tabla 16. Porcentaje cortante y de clivaje en probetas longitudinales del Ensayo charpy	75
Tabla 17. Porcentaje cortante y de clivaje en probetas transversales del ensayo charpy	75
Tabla 18. Temperatura de Transición dúctil-frágil probetas longitudinales	79
Tabla 19. Temperatura de Transición dúctil-frágil probetas transversales	80

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema máquina de ensayo de tracción	33
Figura 2. Gráfico obtenido de una máquina de ensayo de tracción para un acero	33
Figura 3. Deformación de una probeta de tracción desde el inicio hasta ruptura	35
Figura 4. Esquema de una máquina de impacto	37
Figura 5. Esquema de una probeta charpy antes y después del ensayo	37
Figura 6. Gráfico obtenido de un ensayo Charpy para diferentes materiales	38
Figura 7. Durómetro para medida de dureza Rockwell	39
Figura 8. Microscopio binocular	41
Figura 9. Montadora de baquelita	42
Figura 10. Mesa de pulido	42
Figura 11. Máquina cortadora	43
Figura 12. Analizador de imágenes	43
Figura 13. Durómetro	44
Figura 14. Horno Despatch	44
Figura 15. Máquina de ensayos universales	45
Figura 16. Péndulo de impacto	45
Figura 17. Metodología empleada	48
Figura 18. Probetas montadas en baquelita	49
Figura 19. Probeta de tracción suministrada por el fabricante	50
Figura 20. Probetas de impacto suministrada por el fabricante	50
Figura 21. Metalografía probeta 28204 longitudinal ( DI )	55
Figura 22. Metalografía probeta 28210 transversal (Ft)	55
Figura 23. Metalografía probeta 28206 longitudinal (EI)	56
Figura 24. Metalografía probeta 28204 longitudinal (DI)	56

	Pág.
Figura 25. Curva Esfuerzo-Deformación de las distintas probetas	60
Figura 26. Superficie de fractura de cono y copa de la probeta 28210 (F)	61
Figura 27. Curvas Charpy de probetas longitudinales a diferentes Temperaturas	64
Figura 28. Curvas Charpy de probetas transversales a diferentes Temperaturas	66
Figura 29. Curvas Charpy de la probeta D longitudinal y transversal a diferentes temperaturas	67
Figura 30. Curvas Charpy de la probeta E longitudinal y transversal a diferentes temperaturas	67
Figura 31. Curvas Charpy de la probeta F longitudinal y transversal a diferentes temperaturas	68
Figura 32. Curvas Charpy de la probeta importada longitudinal y transversal a diferentes temperaturas	68
Figura 33. Esquema de zonas de fractura, en la superficie de una probeta	69
Figura 34. Superficie de fractura de la probeta 28204 longitudinal (DL) de ensayo charpy a -40.7°C	69
Figura 35. Superficie de fractura de la probeta 28204 longitudinal (DL) de ensayo charpy a 28°C	70
Figura 36. Superficie de fractura de la probeta 28206 longitudinal (EL) de ensayo charpy a 55°C	71
Figura 37. Superficie de fractura de la probeta 28210 longitudinal (FL) de ensayo charpy a 55°C	72
Figura 38. Superficie de fractura de la probeta 28210 longitudinal (FI) de ensayo charpy a 73 °C	72
Figura 39. Superficie de fractura de la probeta importada longitudinal de ensayo charpy a 100 °C	72
Figura 40. Superficie de fractura de la probeta 28206 longitudinal (EL) de de ensayo charpy a 105 °C	73

	Pág.
Figura 41. Programa SPOT 4.0	74
Figura 42. Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de de clivaje en la probeta DI	78
Figura 43. Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta DI	78

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Metalografías de las probetas ensayadas	89
Anexo B Certificados de calidad	95
Anexo C Planos de las probetas de tracción e impacto bajo norma ASTM	97
Anexo D Curvas de calibración de termocuplas y horno Despatch	99
Anexo E Gráficas temperatura de transición dúctil-frágil	102

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN E IMPACTO DEL ACERO ASTM A 572 Gr 50 \*

**AUTORES:** CARREÑO HERRERA CLAUDIA PATRICIA, VILLARREAL MEJIA MARIA CLAUDIA \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA), ensayo de tensión, ensayo charpy, temperatura de transición dúctil-frágil.

**RESUMEN:** En este trabajo se determina la influencia de la variación de la composición química del Acero ASTM A 572 Gr 50 sobre las propiedades mecánicas del material, con el fin de seleccionar la aleación más adecuada a emplearse en diferentes ambientes en países del grupo Andino para la fabricación de estructuras metálicas.

Para la realización de la caracterización Metalográfica y los ensayos de dureza tensión y charpy se tomaron muestras de acero ASTM A 572 Gr. 50 producido por ACASA, fabricadas mediante un proceso de laminado en caliente seguido de un tratamiento térmico de normalizado. Se tomaron probetas de tres coladas diferentes producidas por el fabricante y una muestra de acero importado. El acero ASTM A 572 Gr 50 producido por ACASA y el importado, se encuentra constituido por una estructura ferrito-perlítica, de tamaños de granos pequeños debido a las adiciones de Niobio y Vanadio los cuales refinan el grano afectando directamente las propiedades mecánicas. Todas las probetas superan los requerimientos tensiles mínimos de esfuerzo de fluencia de 345 Mpa, esfuerzo máximo de 450 Mpa y deformación de rotura de 18% establecidos en la norma ASTM A 572. La probeta, con las mayores cantidades de manganeso y las menores cantidades de carbono presenta la menor temperatura de transición dúctil-frágil entre las muestras ensayadas lo que ratifica que estos elementos, producen las variaciones más significativas en dicha temperatura.

---

\*Modalidad: Investigación

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas- Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Luis Emilio Forero Gómez

## ABSTRACT

**TITLE:** METALLOGRAPHIC CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES BY TENSILE AND IMPACT TESTS OF ASTM A 572 Gr 50 STEEL \*

**AUTHORS:** CARREÑO HERRERA CLAUDIA PATRICIA, VILLARREAL MEJIA MARIA CLAUDIA \*\*

**KEY WORDS:** High-strength low-alloy steels (HSLA), the tension test, charpy test, transition – temperature

**ABSTRACT:** In this work the influence of the variation of the chemical composition of the ASTM A 572 Gr 50 steel over mechanical properties of the material is determinate, in order to select the most appropriated alloy for using in different environments in Group Andean countries for the fabrication of metal structures.

For the metallographic analysis and the hardness, tension and charpy tests, was taken samples of ASTM A 572 Gr 50 steel which was produced by ACASA, by means of a hot rolling process fallowed by a normalized thermal treatment. It was taken specimens of three differents coladas produced by the manufacturer and a imported steel sample. The ASTM A 572 Gr. 50 steel produced by ACASA is constituted for a perlitic – ferrite structure, of smalls grain size because of the addition of niobium and vanadium which refine the grains affecting directly the mechanicals properties. Every sample surpass the minimum tensile requirements: Yield point of 345 MPa, Tensile Strength of 450 MPa and minimum Elongation de 18 % standarized by the ASTM A 572. The sample with the greater amount of Manganese and the smaller amount of carbon displays the smaller transition temperature between all the samples tested, which ratifies that this elements produce the most significative variations en this temperature.

---

\* Degree Project.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas- Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Luis Emilio Forero Gómez

## INTRODUCCIÓN

Actualmente los aceros son utilizados y aplicados en múltiples áreas, con variedad de composiciones, pero con un alto control tanto en la materia prima empleada como en los procedimientos utilizados para su fabricación. Al variar el porcentaje de carbono y adicionar elementos como Magnesio, Vanadio, Níquel, Cromo, Nitrógeno, Silicio, entre otros; las diferentes propiedades de los aceros se van modificando.

Dentro de la familia de los aceros podemos encontrar los aceros <sup>16</sup> de alta resistencia y baja aleación (HSLA) conocidos como aceros estructurales, los cuales son un grupo de aceros que utilizan una pequeña cantidad de elementos aleantes para conseguir un límite elástico superior a 275 MPa (40Ksi) en condiciones de normalizado o laminado.

Las aplicaciones comunes del acero estructural en la construcción incluyen perfiles estructurales usados en edificios e instalaciones para industrias; cables para puentes colgantes y concreto predeformados; varillas y mallas electrosoldadas para el concreto reforzado; láminas plegadas usadas para techos y pisos.

Actualmente, ACERIAS DE CALDAS S.A se encuentra interesada en la producción y comercialización de algunos aceros estructurales que puedan ser exportados a países del grupo Andino, como es el caso del acero ASTM A 572 Gr. 50

Conscientes de la calidad que deben tener los productos comercializados a nivel nacional y, aún mas, los que se desarrollan con fines de exportación, se hace preciso realizar una evaluación para establecer las propiedades mecánicas y metalográfica del acero ASTM A 572 Gr. 50, verificando así que el acero

producido cumpla con las especificaciones internacionales. Dentro de las propiedades mecánicas a evaluar se destacan la resistencia a la tracción e impacto, la evaluación del módulo de Young y la dureza superficial del acero

La importancia de este trabajo radica en establecer la calidad de este tipo de aceros estructurales de fabricación nacional, a partir de resultados obtenidos de ensayos estandarizados en normas, esperando constituirse como un aporte investigativo en beneficio de la industria siderúrgica nacional. Además constituye la unión conjunta de trabajo, conocimiento y experiencia entre universidad e industria, encaminada en la consecución de un objetivo común y con el afán prioritario del conocimiento que permita mejorar e innovar productos al servicio de la comunidad.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 GENERALIDADES

El acero estructural HSLA (Alta Resistencia y Baja Aleación) es el material más usado para construcción de estructuras en el mundo. Es fundamentalmente una aleación de hierro, con contenidos bajos de carbono y otras pequeñas cantidades de elementos como manganeso, para mejorar su resistencia, fósforo, azufre, sílice y vanadio para mejorar su soldabilidad y resistencia al medio ambiente. Es un material usado para la construcción de estructuras, de gran resistencia, producido a partir de materiales muy abundantes en la naturaleza. Entre sus ventajas está la gran resistencia a tensión y compresión y el costo razonable.

Los HSLA pueden ser divididos en siete categorías:

1. Aceros autoprotectores: Los cuales contienen pequeñas cantidades de elementos aleantes tales como Cobre y Fósforo para mejorar la resistencia a la corrosión atmosférica y tener endurecimiento por solución sólida.
2. Aceros microaleados Ferrito-Perlíticos: Los cuales contienen una muy pequeña adición de carburos o carbonitruros formados por elementos tales como Niobio, Vanadio, Titanio, para obtener un endurecimiento por precipitación, refinamiento de grano, y control de las temperaturas de transformación.
3. Aceros Perlíticos laminados: En estos aceros se pueden incluir aceros al Carbono-Manganeso, los cuales también pueden contener pequeñas adiciones de otros elementos aleantes para aumentar la resistencia mecánica, dureza, formabilidad y soldabilidad.

4. Aceros con Ferrita Acicular: Los cuales son aceros de bajo Carbono (menores a 0.08% C) con una excelente combinación de alto límite elástico, soldabilidad, formabilidad y buena resistencia mecánica.
5. Aceros de Fase Dual: Los cuales tienen una microestructura de martensita dispersa en una matriz ferrítica y proveen una buena combinación de ductilidad y alta resistencia tensil.
6. Aceros resistentes a la fragilización por hidrógeno: Son aceros de bajo Carbono, bajo Azufre, limitada segregación de manganeso, además con contenido de Cobre mayores a 0.26%.
7. Aceros con forma controlada de inclusiones: Provee mejoras en la ductilidad por pequeñas adiciones de elementos como Calcio, Circonio, titanio y algunas tierras raras, de modo que las formas de inclusiones de sulfuros son cambiadas de hilos elongados a pequeños glóbulos esféricos dispersos.

Estas siete categorías no son necesariamente agrupaciones distintas, un acero HSLA puede tener características de más de un grupo.

## **1.2 ACEROS MICROALEADOS FERRITO- PERLITICOS**

Estos aceros usan adiciones de elementos aleantes como Niobio y Vanadio que incrementan la resistencia de los aceros laminados en caliente sin incrementar el contenido de Carbono o Manganeso. Las propiedades mecánicas de los aceros HSLA no resultan únicamente de la presencia de elementos microaleantes, sino también de la refinación del grano. El refinamiento del grano con métodos controlados de laminado mejora la resistencia y aumenta el Límite elástico en el rango de 345 a 620 MPa. Muchos de los aceros HSLA tienen un contenido de carbono bajo (menor o igual a 0.06%), pero poseen un alto límite elástico, el cual

es atribuido al efecto de un tamaño de grano fino desarrollado durante un control de laminado en caliente y endurecimiento por precipitación, debido a la presencia de Vanadio, Niobio y Titanio.<sup>16</sup>

Los diferentes tipos de aceros microaleados Ferrito-Perlíticos son:

- Aceros microaleados al Vanadio.
- Aceros microaleados al Niobio.
- Aceros al Niobio-Molibdeno.
- Aceros microaleados al Vanadio-Nitrógeno.
- Aceros microaleados al Vanadio –Niobio.
- Aceros microaleados al Titanio.
- Aceros microaleados al Niobio-Titanio.
- Aceros microaleados al Vanadio Titanio.

Estos aceros pueden incluir otros elementos para mejorar la resistencia a la corrosión y el endurecimiento por solución sólida o aumentar la templabilidad.

**1.2.1 Aceros Microaleados al Vanadio- Niobio.** Los aceros microaleados con niobio y Vanadio tienen mayor límite elástico en estado de laminado en caliente que aquel que pueda conseguirse con uno sólo de éstos elementos. Así, en condiciones convencionales de laminado en caliente, los aceros al Niobio-Vanadio poseen la mayoría del incremento de su resistencia, del endurecimiento por precipitación y por lo tanto, poseen una baja temperatura de transición dúctil-frágil. Si el laminado es controlado, la adición de Niobio y Vanadio es especialmente ventajosa para incrementar el límite elástico y disminuir la temperatura de transición dúctil-frágil por refinamiento de grano. El Niobio es más efectivo refinando el grano que el vanadio porque los carburos de niobio son más estables en austenita que los carburos de Vanadio a las temperaturas típicas de laminado. La baja solubilidad del carburo de niobio en austenita provee mayor estabilidad a

las partículas precipitadas, y esta retarda el crecimiento de los granos de austenita.<sup>16</sup>

### 1.3 ACERO ASTM A 572 GR 50

Es un acero de calidad estructural de alta resistencia y baja aleación (HSLA) al Niobio-Vanadio. Este acero por pertenecer a la familia HSLA es más económico que los aceros aleados convencionales, ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, recibe un tratamiento térmico que le da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono<sup>17</sup>.

La composición del acero ASTM A 572 grado 50 según la norma ASTM esta establecida como puede observarse en la tabla 2.

**Tabla 1.** Composición química del acero ASTM A 572 Gr. 50

C % máx.	Mn % máx.	P % máx.	S % máx.	Si % máx.	Nb y V % máx.	Cu % máx.	Ni % Máx.	Cr % máx.	Mo % máx.
0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	0.15	0.60	0.45	0.35	0.15

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. (ASTM A 572)

El carbono equivalente (CE) no debe exceder a 0.45% para aceros estructurales con contenidos de carbono mayor a 0.12%. Este carbono puede ser calculado usando la siguiente formula:

$$CE = C + (Mn+Si) / 6 + (Cu+Ni) / 15 + (Cr+ Mo+V+Nb) / 5 \quad (1)$$

Las propiedades mecánicas estimadas para el acero ASTM A 572 se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Requerimientos Tensiles

Grado	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción mínima		% de elongación mínimo (8 in)
	MPa	ksi	Mpa	Ksi	
50	345	50	450	65	18

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. (ASTM A 572)

Para la fabricación de este acero, Acerías de Caldas S.A. realiza un proceso de colada continua, seguido de un proceso de laminación, el cual se realiza en caliente y, se finaliza, con un tratamiento térmico de normalizado.

**1.3.1 Fases y Microconstituyentes Presentes.** El acero ASTM 572 Gr 50 está constituido básicamente por perlita distribuida en una matriz ferrítica de granos equiaxiales. Las propiedades mecánicas de la perlita depende de su espaciamiento interlaminar y este a su vez depende de las condiciones de enfriamiento del acero, mientras que las propiedades mecánicas de la ferrita dependen del tamaño y forma del grano.

*Ferrita  $\alpha$ :* Es una solución sólida de carbono en hierro  $\alpha$ , con estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC), alcanza la máxima solubilidad sólida (0.0218%) a 723°C. Tiene aproximadamente una resistencia de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, 35% de alargamiento y una dureza aproximada de 90 unidades Brinell. Es el más blando de todos los microconstituyentes del acero, muy dúctil, maleable y magnético. En aceros con contenido de carbono inferior a 0.55% se puede observar como cristales mezclados con perlita, siendo un elemento proeutectoide.

*Perlita:* Es un microconstituyente cuya estructura está formada por láminas de ferrita  $\alpha$  y cementita (Fe<sub>3</sub>C). Tiene una composición química constante y definida. Contiene aproximadamente 6 partes de hierro  $\alpha$  y una de carburo (Fe<sub>3</sub>C). Presenta una resistencia aproximada de 80 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 15%

aproximadamente. La velocidad de enfriamiento repercute en la apariencia de la perlita de tal forma que un enfriamiento brusco formará láminas tan finas y cercanas que no se pueden distinguir claramente al microscopio.

La perlita puede ser clasificada de acuerdo a la distancia interlaminar de la siguiente manera:

- Perlita gruesa: con separación de láminas de más o menos 400  $\mu\text{m}$  que presenta una dureza de 200 Brinell, obtenida por enfriamiento lento del espécimen dentro del horno.
- Perlita normal: posee una separación entre láminas de más o menos 350  $\mu\text{m}$ , y una dureza de 220 Brinell.
- Perlita fina: Proveniente de un enfriamiento rápido, posee una distancia interlaminar de más o menos 250  $\mu\text{m}$  y una dureza de 300 Brinell.<sup>11</sup>

**1.3.2 Determinación de la cantidad de cada fase.** En aquellas regiones en donde existe una sola fase, la cantidad de la fase simple es el 100%. Sin embargo, en las regiones bifásicas se debe calcular la cantidad de cada fase. La regla de la Palanca es utilizada para ello<sup>1</sup>.

Para el cálculo de las fases por la regla de la palanca, el procedimiento a seguir es el siguiente:

Trazar una isoterma a la temperatura a la cual se desea hacer el cálculo. Considerar esta isoterma como una palanca, cuyo punto de apoyo es la composición original de la aleación, y los extremos corresponden a la composición de cada una de las fases.

Elegir la fase a analizar. El brazo de la palanca opuesto a la composición de la fase cuya cantidad se está calculando, se divide entre la longitud total de la palanca para obtener la cantidad de tal fase.<sup>18</sup>

La regla de la palanca puede expresarse en general como:

$$\% \text{ Fase} = (\text{Brazo opuesto de la palanca} / \text{Longitud total de la palanca}) * 100 \text{ (2)}$$

**1.3.3 Tamaño de grano.** El tamaño de grano es un factor decisivo en la calidad y resistencia de los aceros. Las piezas o herramientas fabricadas con aceros de grano grueso, tienen una tendencia muy marcada a dar después del temple, estructuras groseras y frágiles. Las piezas fabricadas con aceros de grano fino son en cambio, muy tenaces.

Todos los aceros presentan la tendencia al crecimiento de grano en la región austenítica, pero esa tendencia no es la misma para todos. Es evidente que el tamaño de grano de un determinado acero es una característica inherente al proceso de fabricación, como una función de la temperatura a la que se calienta y del tiempo que se mantiene dicha temperatura.

El tamaño de grano se puede expresar de varias formas, siendo aceptables las que se dan a continuación:

- Los números de tamaño de grano A.S.T.M., arbitrariamente elegidos y relacionados exponencialmente, con el número de granos por pulgada cuadrada, en una proyección a 100 aumentos.
- El número medio de granos cortados por una línea de longitud definida.
- El número medio de granos por milímetro cuadrado.

- El área media de los granos en milímetros cuadrados.

La determinación de tamaño de grano, ya sea por cualquiera de los métodos que se describen a continuación, puede servir para prever muchos aspectos relativos al comportamiento de un acero en el tratamiento térmico y durante el servicio que pueda prestar cuando se encuentra sometido a diversos tipos de esfuerzos.<sup>19</sup>

- o **Métodos manuales para la determinación de tamaño de grano.** Los ensayos para la determinación de tamaño de grano en materiales metálicos son esencialmente procedimientos de medida de estructuras geométricas básicas. Estas estructuras son independientes del metal o aleación objeto de estudio. En general estas técnicas pueden ser aplicadas también a materiales no metálicos siempre y cuando su estructura sea similar a las encontradas en las gráficas de comparación.

Es importante manifestar que el uso de los métodos para la estimación de tamaño de grano promedio, no garantizan una medida exacta. Una estructura metálica es un agregado cristalino tridimensional con variación de tamaño y forma. Por lo tanto, de una superficie de observación a otra variará la distribución de área a través de la estructura, aclarando esto que no se tendrá la misma exactitud de medida con dos campos de visualización diferentes.

Teniendo en cuenta que el tamaño y posición de los granos en la microestructura es completamente aleatorio, se puede pensar que la escogencia de un campo de visualización al azar lograría mejorar esta condición de desorden. Esto evitaría preferencias hacia campos específicos que podrían desviar los resultados. Lo anterior no es suficiente si se tiene en cuenta que un proceso al azar, no se considera representativo. La representatividad implica todas las partes de la muestra que contribuyen a los resultados. Por tal motivo no se debe tomar como

tamaño de grano promedio el resultado obtenido de la medición en un solo campo de visión.

En la aplicación de cualquier método de medida de tamaño de grano promedio, es necesario considerar tanto el área que ocupa el grano mismo, como el área ocupada por los límites de grano.

Para la determinación del tamaño de grano promedio en materiales formados por dos o más constituyentes, el tamaño de grano debe hacer referencia a la matriz. Se pueden tomar como excepciones los casos en donde la segunda fase o constituyente, existe en suficiente cantidad o su continuidad es significativa. En estos casos el tamaño de grano debe estimarse y reportarse por separado. Las fases o constituyentes menores e inclusiones, no deben ser consideradas en la estimación del tamaño de grano.

Para determinar el Tamaño de grano bajo la norma ASTM E 112 se puede utilizar varios métodos, entre los cuales están:

- Procedimiento de comparación o método directo.
- Procedimiento planimétrico o método de Jeffrie.
- Procedimiento de intercepto lineal o método de Heyn.
- Procedimientos de interceptos circulares.
- Procedimiento del círculo único o método de Hilliard.
- Procedimiento de los círculos concéntricos o método de Abrams.

De los cuales el que será utilizado para la investigación es el **procedimiento de comparación o método directo** este procedimiento sólo podrá ser aplicado a materiales con granos equiaxiales. La clasificación de tamaño de grano en observaciones microscópicas se hace generalmente comparando los granos de

acero, con cartas o gráficos pertenecientes a una clasificación establecida por la A.S.T.M.<sup>19</sup>

La medición se lleva a cabo tomando una micrografía a 100 aumentos y comparando esta con una serie de gráficos correspondientes a los distintos tamaños de grano. El número del gráfico más parecido al aspecto de la probeta representa el tamaño de grano.

Cuando aparecen granos de varios tamaños, el resultado se expresa con dos números, correspondientes a dos tamaños de grano, con el porcentaje existente de cada uno. Esto es lo que se conoce como tamaño de grano dúplex.

Los patrones A.S.T.M. han sido elegidos de tal forma que cubran los tamaños de grano encontrados normalmente en el acero. Cada patrón o gráfico lleva un número que expresa un tamaño de grano los cuales están distribuidos en números del 1 al 8.

El número de gráfico representativo de un tamaño de grano, se encuentra relacionado con el número de granos por pulgada cuadrada observados, en una micrografía a 100 aumentos, mediante la Ecuación 3

$$\text{Número de granos por pulgada cuadrada} = 2^{N-1} \times 100 \quad (3)$$

En la cual N es el índice de grano o número A.S.T.M.

Los aceros que se encuentran en el rango entre 1 y 5 se consideran aceros de grano grueso y los encontrados entre 5 y 8 son considerados de grano fino. Si el tamaño de grano es precisamente 5, se observan los pocos granos que se desvían de este tamaño. Si son finos se considera el acero de grano fino de lo contrario se consideran de grano grueso.

Es posible encontrar tamaños de grano fuera del rango establecido. Por ejemplo, si los granos son mayores que los del número 1, entonces se hace una nueva observación a 50 aumentos. Si son similares en tamaño a los del número dos observado a 100 aumentos, se designan como tamaño de grano 0. Si se comparan con los del número 1, se designan como 00. Por el contrario cuando se encuentran tamaños inferiores al número 8, entonces se observan a 200 aumentos y se designan como 9 y 10 si son comparables con los números 7 y 8 observados a 100 aumentos respectivamente.

$$Q = 2 \log_2 (M/M_b) \quad (4)$$

$$Q = 6.64 \log_{10} (M/M_b) \quad (5)$$

En donde:

Q: Factor de corrección.

M: Aumentos a los que fue hecha la observación.

M<sub>b</sub>: Aumento básico al que está referida la carta de comparación.

También es posible hacer este tipo de medidas a diferentes aumentos cuando el de 100 no es satisfactorio. En estos casos si el tamaño de grano es reportado mediante número A.S.T.M. se debe aplicar un factor de corrección que se obtiene mediante la Ecuación 3.

- **Preparación de Muestras para Análisis Metalográfico.** Se puede afirmar sin duda alguna que la parte de mayor importancia en el análisis metalográfico es el estudio microscópico de las probetas. Para que este estudio refleje resultados confiables es imprescindible realizar una adecuada preparación de las muestras. La finalidad de la preparación de las muestras no es otra que obtener una superficie totalmente plana y especular, que se logra gracias a una remoción de material por medio de lijas, paños y material abrasivo.

Es importante mencionar, que para lograr observar la verdadera microestructura, es necesario efectuar un ciclo de pulido-ataque que conste de por lo menos 5 iteraciones.

La preparación de las muestras para análisis metalográfico la podemos dividir en varios pasos:

- *Toma de las muestras:* es uno de los pasos de mayor importancia debido a que la muestra debe ser representativa del material que será examinado. La obtención de estas muestras se realiza por medio de corte con sierras, discos y equipos de corte diseñados para tal fin.
- *Desbaste grosero:* se realiza con lijas gruesas y su objetivo es eliminar las irregularidades en la superficie del espécimen tales como rebabas producto del corte, pero sin llegar a ocasionar rayas de profundidad considerable.
- *Desbaste intermedio y final:* se llevan a cabo sobre las mesas de lijado. Su objetivo es eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste grosero. Se utilizan lijas en los rangos de 240 a 600.
- *Pulido:* el fin del pulido consiste en eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste final, se lleva a cabo en equipos provistos de paños sobre los cuales se depositan abrasivos con el propósito de obtener una superficie pulida. Entre los abrasivos más comunes podemos citar: polvo de diamante, alúmina y óxido de magnesio. Todas las rayas y manchas deben ser removidas, aunque muchas rayas finas del paso de pulido final usualmente se pueden tolerar. Las rayas de lija y pulido con abrasivos con diámetros mayores a alrededor de  $1\mu\text{m}$  deben ser removidas en lo posible.

- *Ataque de las muestras para análisis metalográfico*: el objetivo del ataque es revelar el tamaño de grano y las fases presentes. El mecanismo de ataque se basa por una parte en la destrucción selectiva de la superficie del metal y por otro lado, en las diferentes formas de teñir o colorear la superficie de las distintas fases presentes.

Es importante mencionar, que para lograr observar la verdadera microestructura, es necesario efectuar un ciclo de pulido-ataque que conste por lo menos 5 iteraciones.

Los reactivos utilizados en el ataque son generalmente compuestos de ácidos orgánicos, inorgánicos y otras sustancias de mayor complejidad, disueltas en solventes apropiados como agua, alcohol, glicerina, glicol mezcla de varios disolventes.

Un factor de mucha influencia en el revelado de las microestructuras es el tiempo de ataque que puede oscilar según el espécimen y el reactivo entre unos pocos segundos y 30 o más minutos. Un excesivo ataque mancha el espécimen y evita que la microestructura sea apreciada.

El ataque del espécimen es un paso crítico en la secuencia de la preparación. Para el análisis digital de imágenes se precisa una condición de ataque plano, la cual requiere un contraste con una matriz clara, debido a que se obliga un alto grado de delineación de los límites de grano.

Separadamente de los ataques que sólo utilizan reactivos químicos, encontramos otros métodos como el ataque electrolítico, que consiste en hacer pasar una corriente continua, variando su intensidad a través de la celda electrolítica, que contiene un electrolito apropiados y en donde la probeta hace las veces de ánodo y el cátodo es de una material insoluble como platino o grafito.<sup>11</sup>

## 1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

Existe una correspondiente relación entre las propiedades mecánicas de un material y su tamaño de grano. Se espera un aumento de la resistencia mecánica del acero a medida que el tamaño de grano del mismo disminuye. El tamaño de grano puede ser afinado a través del tratamiento térmico.

En los aceros de alta resistencia y baja aleación los cambios en las propiedades mecánicas resultan del uso del Niobio y Vanadio, junto con un proceso de laminado controlado, los cuales incrementan el límite elástico, la soldabilidad y la dureza. El tamaño de grano de la ferrita se reduce dando como consecuencia directa un incremento en el límite elástico. Debido a esto, cualquier reducción en la dureza por un endurecimiento por precipitación puede ser tolerada. Sin embargo, las propiedades se mantienen constantes solo en muestras tomadas en la dirección de laminado. En la dirección transversal la dureza se disminuye considerablemente, y el conformado es inadecuado debido a la forma característica de las inclusiones no metálicas las cuales, durante el laminado, se elongan en la dirección de éste.<sup>16</sup>

La resistencia a la tracción es la oposición que ofrece una pieza a ser deformada cuando es sometida a la acción de fuerzas externas. Bajo la acción de esas fuerzas externas y dependiendo de la magnitud, el acero se comporta de dos maneras diferentes, elástica y plástica. Un comportamiento elástico significa que la pieza retornará a su forma original, una vez que se suspenda la acción de la fuerza. Un comportamiento plástico significa que la pieza permanecerá deformada luego de cesar la acción de la fuerza. Cuando una pieza de acero se somete a la acción de una fuerza en constante aumento, se comportará de manera elástica mientras que la carga sea de baja magnitud hasta cierto punto, límite elástico, después del cual se comporta de manera plástica. Para la construcción de

puentes los diseñadores harán uso de esa característica elástica cuidándose de no someter al acero a solicitudes cercanas al Límite Elástico, si no que usualmente lo exigen a la mitad de ese valor. Esto es lo que se denomina Factor de Seguridad (o Factor de Ignorancia), que se utiliza para compensar eventos imprevistos que puedan surgir durante el servicio.

**1.4.1 Determinación de la resistencia a la tracción.** Puede hacerse un cálculo aproximado de la resistencia de los aceros a carbono, normalizados o recocidos, a partir de su microestructura y basándose en las siguientes cifras (datos de Arnold)<sup>20</sup>, de las propiedades de los microconstituyentes.

**Tabla 3.** Propiedades de los microconstituyentes de aceros hipoeutectoides

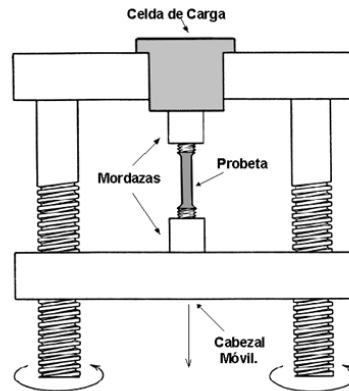
Microconstituyente	Resistencia a la Tracción Aproximada (Kg/mm <sup>2</sup> )	Ecuación
Perlita Laminar Normal	80	$RTA = [(28*f) + (80*p)]/100$
Ferrita	28	

Metalografía microscópica práctica<sup>20</sup>.

**1.4.2 El ensayo de Tensión.** Se emplea para evaluar la resistencia a la tensión del acero. Se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM E8 y consiste en someter el material a cargas o esfuerzos los cuales se van incrementando a velocidades constantes, en donde se genera deformaciones elásticas y/o plásticas como respuesta según el nivel de la carga. Este ensayo suministra información sobre la resistencia y ductilidad del acero bajo esfuerzos de tensión uniaxial. De este se pueden obtener propiedades mecánicas de gran importancia: Límite de Fluencia, Resistencia máxima a la Tensión, Porcentaje de elongación y Porcentaje de reducción en el área, entre otras.<sup>21</sup>

Se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura 1.

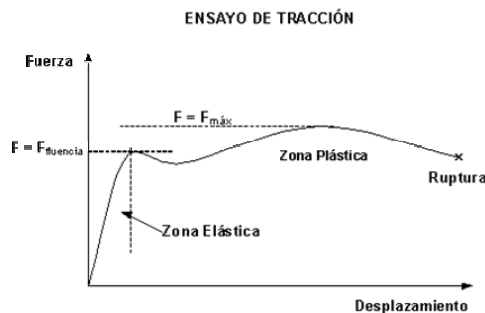
**Figura 1.** Esquema máquina de ensayo de tracción



Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html)

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un plotter que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída. (Figura 2)

**Figura 2.** Gráfico obtenido de una máquina de ensayo de tracción para un acero



Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html)

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.

Se tiene entonces que en la zona elástica se cumple:

$$F = K (L - L_0) \quad (6)$$

F: fuerza

K: constante

L: longitud bajo carga

$L_0$ : longitud inicial

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. A partir de este punto, si se quita la carga la probeta quedaría más larga que al principio. Deja de ser válida la 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:

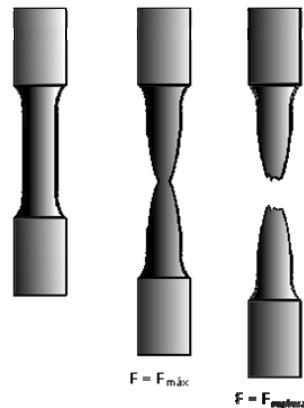
$$F = F_{yp} \text{ (yield point)} \quad (7)$$

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.

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.

La figura 3 muestra la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

**Figura 3.** Deformación de una probeta de tracción desde el inicio hasta ruptura



Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html)

Para expresar la resistencia en términos independientes del tamaño de la probeta, se dividen las cargas por la sección transversal inicial  $A_0$ , obteniéndose:

Resistencia a la fluencia:

$$\sigma_{yp} = F_{yp}/A_0 \quad (8)$$

Resistencia a la tracción:

$$\sigma_{ult} = F_{máx}/A_0 \quad (9)$$

Unidades:  $\text{Kg}/\text{mm}^2$  o MPa o Kpsi

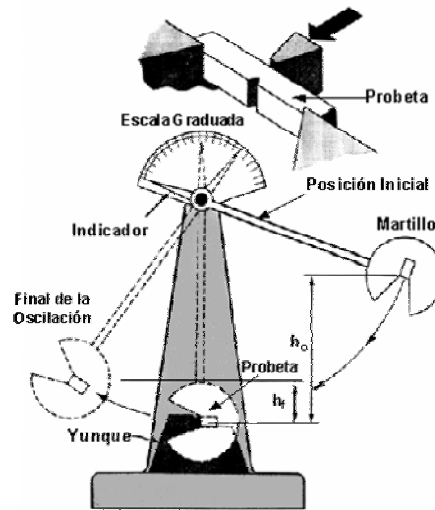
**1.4.3 El ensayo de Tenacidad.** Se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM E23 y puede utilizarse además para determinar el intervalo de temperatura para la transición de un comportamiento dúctil a frágil del metal al disminuir la temperatura. La temperatura de transición se define como la temperatura a la cual el acero pierde su habilidad para fluir plásticamente ante la presencia de un

impacto repentino o una grieta. Para los aceros HSLA las temperaturas de transición en el estado de laminado y en condiciones de normalizado son controladas principalmente por la composición química y el tamaño de grano de ferrita. A temperaturas por debajo de la temperatura de transición la fractura frágil se iniciará de una discontinuidad y se propagará rápidamente a través de las regiones de la estructura que están expuestas sólo a niveles bajos de esfuerzos aplicados.

El rango de temperaturas cercanas a la temperatura de transición, una deformación plástica es requerida para iniciar la fractura frágil y los esfuerzos residuales son menos perjudiciales. A temperaturas bien por debajo de la temperatura de transición, el diseño es crítico; el esfuerzo nominal no debe exceder el límite elástico en los lugares donde la grieta tiene tendencia a fluir. Cada tipo de acero de alta resistencia y alta aleación posee unos rangos de valores de temperaturas de transición dúctil-frágil que depende de la composición química, del tamaño de grano de la ferrita y de otras variables.

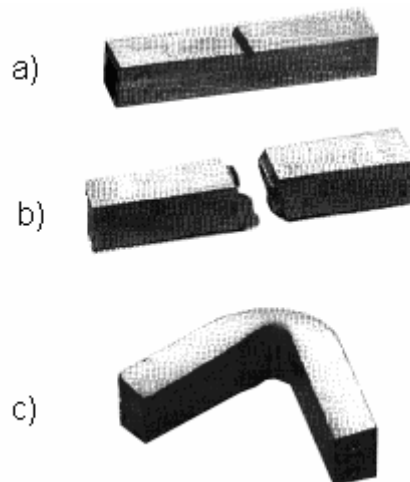
El ensayo de impacto consiste en dejar caer un pesado péndulo, el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma paralelepípedo ubicada en la base de la máquina (ver Figura 4). La probeta posee un entalle estándar para facilitar el inicio de la fisura; este entalle recibe el nombre de V-Notch (ver Figura 5). Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su camino alcanzando una cierta altura que depende de la cantidad de energía disipada al golpear. Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad se doblan sin romperse. Este comportamiento es muy dependiente de la temperatura y la composición química, esto obliga a realizar el ensayo con probetas a distinta temperatura, para evaluar la existencia de una "temperatura de transición dúctil-frágil". Este ensayo se lleva a un gráfico como el mostrado en la Figura 6 en donde se puede apreciar un fuerte cambio en la energía disipada para algunos aceros de bajo carbono.<sup>22</sup>

**Figura 4.** Esquema de una máquina de impacto



Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html)

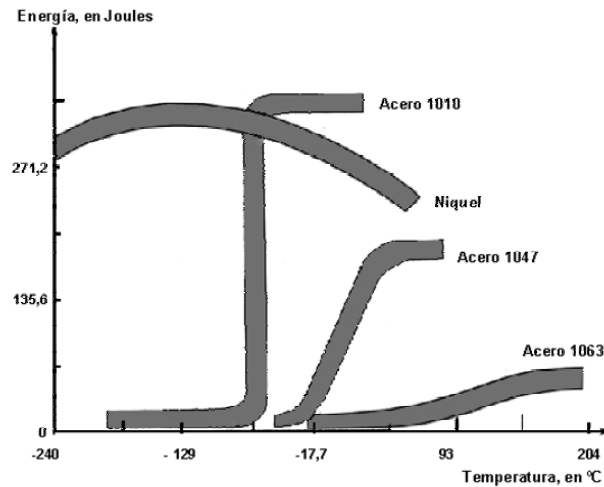
**Figura 5.** Esquema de una probeta charpy antes y después del ensayo



a) probetas antes del ensayo, b) probeta después del ensayo, fractura frágil c) probeta después del ensayo, fractura dúctil

Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html)

**Figura 6.** Gráfico obtenido de un ensayo Charpy para diferentes materiales



Disponible en Internet: [www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html](http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-1.html)

**1.4.4 El ensayo de Dureza Rockwell.** El ensayo de dureza mas ampliamente utilizado es el ensayo Rockwell. En general su aceptación es debido a su velocidad, libertad de errores humanos, habilidad para distinguir pequeñas diferencias de dureza en aceros duros y al pequeño tamaño de la indentación. Este ensayo utiliza la profundidad de la indentación, bajo carga constante, como medida de la dureza. Una carga pequeña de 10 Kg es aplicada para preparar el espécimen, minimizar la preparación superficial requerida y reducir la tendencia al hundimiento del indentador. Luego, la mayor carga es aplicada, y la profundidad de la indentación es automáticamente mostrada en un dial en términos de números de dureza arbitrarios. El dial contiene 100 divisiones, cada una representa una penetración de 0.002 mm y es inverso, es decir, una dureza alta, corresponde a una baja penetración y resulta en un alto número de dureza.

Es importante destacar que una sólo combinación de carga e indentador, no producirá resultados satisfactorios para materiales con amplio rango de dureza, por tal razón se utilizan cargas e indentadores diferentes, especificando para cada ensayo el utilizado. Esta especificación se realiza antecediendo al número de

dureza una letra, la cual es indicativa de la carga y el indentador que se utilizó en el ensayo. Durezas de aceros colocados en la escala C, corresponden a un indentador de diamante y una carga de 150 Kg. Para materiales menos duros son usualmente ensayados en la escala B con una esfera de acero de 16 mm de diámetro y una carga de 100 Kg. La escala A, con penetrador de diamante, y carga de 60 Kg, es la escala de dureza más extensa. En la Figura 7 se muestra un durometro empleado para la medida de dureza Rockwell.

**Figura 7.** Durómetro para medida de dureza Rockwell



Disponible en Internet: [www.unizar.es](http://www.unizar.es)

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS

**2.1.1 Equipos.** Para la realización de las pruebas se emplearon los siguientes equipos:

- **Microscopio Binocular**, marca *OLIMPUS* modelo U-LH 100L.

**Figura 8.** Microscopio Binocular



- **Montadora de baquelita**, marca Buehler 1334 AB.

**Figura 9.** Montadora de baquelita



- **Mesa de pulido buehler 05358**

**Figura 10.** Mesa de pulido buehler



- **Máquina cortadora** , marca Buehler 10-1000 AB.

**Figura 11.** Máquina cortadora



- **Analizador de Imágenes**, marca *LEICA*, modelo Q500MC.

**Figura 12.** Analizador de imágenes



- **Medidor de durezas**, marca *CLARK*, modelo C – 8A.

**Figura 13.** Durometro



Patrón: 64+/- 0.5 HRA

Calibración: 63.5 HRA

- **Horno**, marca Despatch LEB1-23-1. El horno despatch fue calibrado utilizando termocupas tipo J y K (ver anexo D).

**Figura 14.** Horno Despatch empleado



Temperatura maxima: 150°C +/- 2°C

- **Maquina universal de ensayos mecánicos**, marca *SHIMADZU AG-1*.

**Figura 15.** Máquina de ensayos universales



Carga máxima 25 Ton.

Precisión 1%

- **Pendulo de impacto**, marca Trebel Werk Dusseldorf PSW 30

**Figura 16.** Péndulo de impacto empleado



**2.1.2 Material.** Para la realización de las diferentes pruebas del material se tomaron muestras de acero ASTM A 572 Gr. 50 producido por la acería colombiana, fabricadas mediante un proceso de laminado en caliente seguido de un tratamiento térmico de normalizado. Se tomaron probetas de 3 coladas diferentes producidas por el fabricante y una muestra de acero importado, identificadas por la nomenclatura mostrada en la tabla 4.

**Tabla 4.** Nomenclatura de las probetas de acuerdo al número de colada

Número de colada	Nomenclatura	Dirección longitudinal	Dirección transversal
28204	D	DI	Dt
28206	E	EI	Et
28210	F	FI	Ft
Importado	Importada	Importada longitudinal	Importada transversal

La tabla 5 ilustra la composición química del acero según norma ASTM, y el de las tres muestras del acero nacional junto con el acero importado. Se anexan certificados de calidad (ver anexo B).

**Tabla 5.** Composición química del acero ASTM A 572 Gr. 50 según norma ASTM y aceros suministrados por el fabricante.

Probeta	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Nb	% V	% Cu	% Ni	% Cr	% Mo	% Sn
<b>ASTM*</b>	0.23	1.35	0.04	0.05	0.40	0.15	0.15	0.60	0.45	0.35	0.15	-.**
<b>D</b>	0.20	0.57	0.009	0.021	0.19	0.021	0.005	0.23	0.17	0.10	0.02	0.015
<b>E</b>	0.18	0.54	0.009	0.017	0.15	0.017	0.004	0.18	0.08	0.10	0.02	0.013
<b>F</b>	0.22	0.59	0.007	0.027	0.17	0.020	0.005	0.21	0.09	0.11	0.02	0.014
<b>Importada</b>	0.12	0.78	0.025	0.04	0.18	0.024	-.***	0.16	0.05	0.06	0.011	0.013

\* Valores máximos reportados en la norma ASTM A 572

\*\* Valor no reportado por la norma ASTM A 572

\*\*\* Valor no reportado dentro de la composición del acero

- **Número de probetas a utilizar**

1. Análisis Metalográfico: 8 probetas, 2 por cada composición, una longitudinal a la dirección de laminación y una transversal, para la determinación de fases, impurezas y tamaño de grano.
2. Ensayo de Dureza: se utilizarán las mismas probetas obtenidas para el análisis metalográfico.
3. Ensayo de Tensión: 8 Probetas, 2 por cada composición (muestra y contra muestra).
4. Ensayo de tenacidad: 56 probetas en total. Se realizarán ensayos para cada una de las 4 composiciones a 5 diferentes temperaturas con muestra y contramuestra para un total de 40 probetas en la dirección longitudinal y 16 probetas más para ensayar en dirección transversal las distintas composiciones para 4 temperaturas propuestas.

## **2.2 METODOLOGIA**

La investigación se realizó de acuerdo a la metodología mostrada en la Figura 17.

**Figura 17.** Metodología empleada



**2.2.1 Preparación de muestras.** Se recibieron probetas para realizar ensayos de tracción e impacto según especificaciones de normas ASTM E 8 Y ASTM E 23 respectivamente, probetas para análisis metalográfico y ensayos de dureza según normas ASTM E 3 y ASTM E 18 respectivamente.

○ **Preparación Metalográfica.** La finalidad de la preparación de las muestras para análisis metalográfico no es otra que obtener una superficie plana y especular, que se logró gracias a la remoción de material por medio de lijas, paños y material abrasivo. El material fue preparado siguiendo el proceso a continuación mostrado.

- Corte longitudinal y transversal: realizado por medio de la máquina cortadora Buehler.

- Montaje en baquelita. Fue realizado por medio de la máquina montadora de muestras Buehler. (figura 18)
- Desbaste ( papel esmeril No. 120). Se realizó con el fin de eliminar las irregularidades en la superficie tales como rebabas producto del corte.
- Pulido (papel esmeril No. 240, 320, 400 y 600). Fue realizado con el fin de eliminar las rayas ocasionadas por el desbaste.
- Pulido fino. Se realizó con el fin de eliminar las rayas ocasionadas por el pulido, utilizando la Mesa de Pulido Buehler provista de paños sobre los cuales se depositaron abrasivos con el propósito de obtener una superficie pulida gracias a la remoción del material superficial sin producir deformación o flujo del mismo. Fue realizado mediante tres ciclos alternativos de pulido y ataque utilizando como abrasivos Alúmina al  $5\mu$  y al  $0.05\mu$ , y como reactivo de ataque Nital al 2%.
- Ataque: Fue utilizado como reactivo de ataque Nital al 2% y el tiempo de ataque fué de 15 segundos.

**Figura 18.** Probetas montadas en baquelita



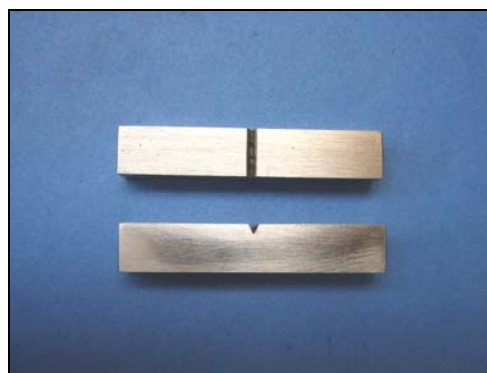
- **Probetas para ensayos de tracción** Se recibió el material mecanizado (ver figura 19) según especificaciones de la norma ASTM E 8 como se muestra en el anexo C

**Figura 19.** Probeta de tracción suministrada por el fabricante



- **Probetas para ensayos de impacto:** Se recibió el material mecanizado (ver figura 20) según especificaciones de la norma ASTM E 23 como se muestra en el anexo C.

**Figura 20.** Probeta de impacto suministrada por el fabricante



- **Probetas para ensayos de dureza.** Se utilizaron las probetas obtenidas del procedimiento de preparación metalográfica (ver figura 18).

### 2.2.2 Análisis

- **Análisis metalográfico.** Se tomaron las muestras obtenidas de la preparación metalográfica para la determinación de fases, tamaño de grano e impurezas con la ayuda del Sistema de Análisis de imagen y del Microscopio Binocular.
- **Fractografía.** Este análisis fué realizado sobre las superficies fracturadas de las probetas de tracción e impacto del acero ASTM A 572 Gr. 50 con el fin de obtener conclusiones de acuerdo a la forma y aspecto de dicha superficie. Fue utilizado el Sistema de Análisis de imagen y el Microscopio Binocular Olympus

### 2.2.3 Ensayos mecánicos

- **Ensayo de dureza.** Este ensayo fue realizado para determinar las variaciones de dureza entre las 3 diferentes coladas de acero ASTM A 572 Gr. 50 y la muestra de acero importado. Para esto fue utilizado el Durómetro Clark Hardness Tester.
- **Ensayo de tracción.** Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar propiedades en tensión del acero ASTM A 572 Gr. 50 laminado en caliente y normalizado como: Límite Elástico, Porcentaje de Elongación, Porcentaje de reducción de Área, Resistencia a la Fluencia, Módulo de Young, Resistencia última a la tracción, entre otros. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente según norma ASTM E 8. Para este ensayo se empleó la máquina universal de ensayos mecánicos SHIMADZU.
- **Ensayo de impacto.** Este ensayo se realizó para determinar la temperatura de transición Dúctil-Frágil del acero ASTM A 572 Gr. 50 de la curva de impacto Charpy según la norma ASTM E 23 en un péndulo de impacto Trebel-

Werk Dusseldorf. Se realizó el ensayo de cada una de las coladas suministradas junto con la muestra de acero importado a 5 temperaturas diferentes: Temperatura ambiente, entre 55°C - 58°C, 75°C - 78°C, y 100 - 105°C y por debajo de los 0°C. Para las probetas ensayadas a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, se utilizó el horno con controlador de temperatura Humboldt Testing Equipment y para las probetas ensayadas a temperatura inferior a los 0°C, se utilizó una hielera con hielo seco y alcohol, para llegar a las temperaturas escogidas. Para ambos casos se utilizaron termocuplas.

Para determinar la temperatura de de transición Dúctil –Frágil se realizo siguiendo el proceso a continuación mencionado:

1. Se hicieron varias mediciones del ancho y largo de la fractura plana(A y B respectivamente) con ayuda de un software de tratamientos de imágenes spot y se determinó por promedio en las mediciones de cada una de las caras de las probeta el valor final de A y B.
2. Con los valores finales de A y B se determinó de la Tabla 6, el porcentaje de cortante para cada probeta ensayada.
3. Luego se determinó el porcentaje de clivaje de la siguiente ecuación:  
$$\% \text{cortante} + \% \text{clivaje} = 100\% \quad (10)$$
4. Finalmente para determinar la temperatura de transición bajo los criterios de 50% de clivaje (FATT) y el del 50% de energía absorbida, se realizaron gráficas de T vs % clivaje y T vs energía absorbida.

**Tabla 6.** Porcentajes de cortante para probetas ensayadas en Charpy

		Dimension A, mm																	
Dimension B, mm	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

Fuente Norma ASTM E 23

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 ANÁLISIS METALGRÁFICO

**3.1.1 Fases presentes.** Al analizar la microestructura de las 4 composiciones de acero, mediante microscopía óptica (una vez atacadas con nital), se observa en todos los casos, una estructura compuesta por colonias de Perlita y Ferrita; esta última se encuentra en forma de granos equiaxiales (figuras 21-22). Los porcentajes de estas fases se presentan en las Tablas 7 y 8.

**Tabla 7.** Porcentajes de fases presentes en las probetas longitudinales

PROBETA	MEDIDOS		TEÓRICOS	
	%Ferrita proeutectoide	% Perlita	%Ferrita total	%Cementita
DL	76.44	23.56	79.07	20.93
EL	79.79	20.21	82.05	17.95
FL	77.43	22.57	79.95	20.05
IL	82.40	17.60	84.36	15.64

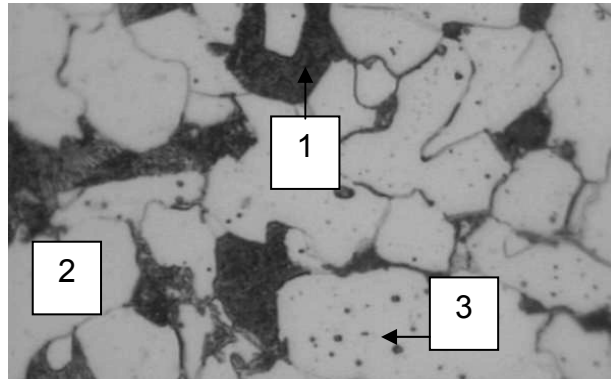
- Medidas realizadas con el analizador de imágenes, con un 95% de confiabilidad.
- Los resultados Medidos corresponden a los barridos realizados por el analizador al identificar la ferrita proeutectoide y la perlita presente en la microestructura, mientras que los Teóricos fueron determinados con ayuda de fórmulas matemáticas (ecuación 2) en base a los medidos.

**Tabla 8.** Porcentajes de fases presentes en las probetas transversales

PROBETA	MEDIDOS		TEÓRICOS	
	%Ferrita proeutectoide	% Perlita	%Ferrita total	%Cementita
DT	74.98	25.02	77.77	22.23
ET	68.80	31.20	72.29	27.71
FT	76.50	23.50	79.12	20.88
Importada	79.17	20.83	81.50	18.50

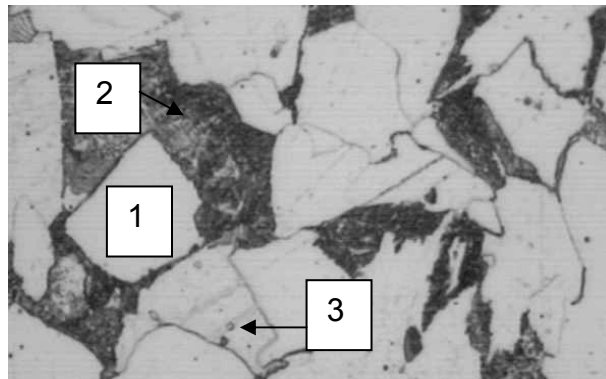
- Medidas realizadas con el analizador de imágenes, con un 95% de confiabilidad.
- Los resultados Medidos corresponden a los barridos realizados por el analizador al identificar la ferrita proeutectoide y la perlita presente en la microestructura, mientras que los Teóricos fueron determinados con ayuda de fórmulas matemáticas (ecuación 2) en base a los medidos.

**Figura 21.** Metalografía probeta 28204 longitudinal ( DI )



Aumentos 500x, Ataque: Nital 2%, 1) Perlita, 2) Ferrita 3) Partículas de precipitado.

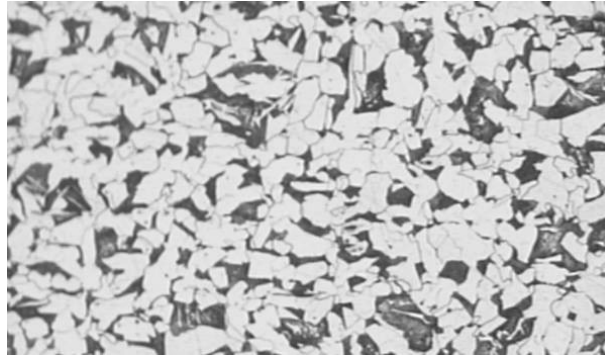
**Figura 22.** Metalografía probeta 28210 transversal (Ft)



Aumentos 500x. Ataque: Nital 2% 1)Ferrita, 2)Perlita, 3)Partículas de precipitado.

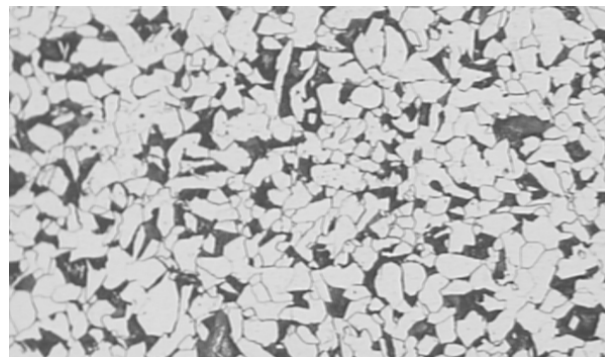
**3.1.2 Tamaño de grano.** Como se puede observar en las tablas 9 y 10, el tamaño de grano reportado por las 3 composiciones suministradas lo mismo que para el acero importado es pequeño (ver figura 23 y 24), lo cual es indicativo que se presentaron temperaturas de tratamiento térmico bajas y que el tiempo en el proceso de laminado en caliente no fue grande, lo cual permitió que los granos no alcanzaran un crecimiento significativo.

**Figura 23.** Metalografía probeta 28206 longitudinal (EL)



Aumentos 100X, ataque: nital 2% estructura general perlita ferrita.

**Figura 24.** Metalografía probeta 28204 longitudinal (DI)



Aumentos 100x estructura general perlita, ferrita ataque nital 2%

Los resultados presentados en las tablas 9 y 10 muestran que el tamaño de grano de las probetas suministradas por el fabricante, lo mismo que el acero importado es pequeño comprendido entre 11 y 12. Las diferencias entre los valores de tamaño de grano presentados no se consideran significativas y se encuentran dentro del error propio del equipo analizador de imagen empleado.

**Tabla 9.** Tamaño de grano en las probetas longitudinales

PROBETA	POR CAMPO			PROMEDIO	
	Ferrita	Perlita	Total	Ferrita	Perlita
DL	8	11	9	10	11
EL	8	11	8	8	11
FL	9	12	9	10	12
Importada	9	12	9	9	12

Medidas realizadas con el analizador de imágenes, con un 95% de confiabilidad.

**Tabla 10.** Tamaño de grano en las probetas transversales

PROBETA	POR CAMPO			PROMEDIO	
	Ferrita	Perlita	Total	Ferrita	Perlita
DT	8	11	9	9	10
ET	10	10	10	8	10
FT	10	12	10	9	12
Importada	9	12	9	9	12

Medidas realizadas con el analizador de imágenes, con un 95% de confiabilidad.

### 3.2 DUREZA

**Tabla 11.** Ensayo de dureza HRA

Probetas	HRA
28204 (D)	48.44
28206 (E)	52
28210 (F)	49.8
Importada	51

Todos los datos obtenidos solo corresponden a las muestras ensayadas

Total número de tomas de dureza por muestra 5 en total

La dureza fue tomada a temperatura ambiente

Los resultados de dureza obtenidos fueron reportados en la escala de dureza Rockwell A, la cual se emplea para materiales blandos y duros. Los resultados presentados, indican números de dureza bajos, lo cual cataloga al material como un acero blando. Estos resultados están en concordancia con las cantidades de ferrita y cementita presente en el acero (ver tablas 7 y 8). En las muestras producidas por ACASA al igual que el acero importado, las cantidades de ferrita

son visiblemente mucho mayores a las cantidades de cementita presente. Por ser la ferrita el microconstituyente más blando en aceros y el de mayor proporción en las muestras utilizadas, los valores de dureza son muy bajos.

Los valores de dureza de las distintas coladas que se aprecian en la Tabla 11, no presentan diferencias significativas entre ellos, esto se le atribuye a que no existen diferencias en los resultados de tamaño de grano, el cual a su vez afecta directamente a la dureza.

### **3.3 ENSAYO DE TENSION**

Al analizar los resultados obtenidos del ensayo de tracción (ver Tabla12 y Figura 25), observamos que las probetas producidas por el fabricante y la muestra de acero importado superan los requerimientos tensiles mínimos de la Norma ASTM A 572.

Se puede observar que los resultados de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de rotura se encuentran muy cercanos entre sí para las cuatro composiciones ensayadas. Las diferencias que se presentan no son significativas y se atribuyen a que en la práctica es usual obtener resultados con un margen de error entre el 10 y el 20%.

Cabe destacar que la muestra de acero importado presenta un aumento en el porcentaje de elongación comparado con las muestras de acero suministradas por el fabricante, presentando así mayor ductilidad.

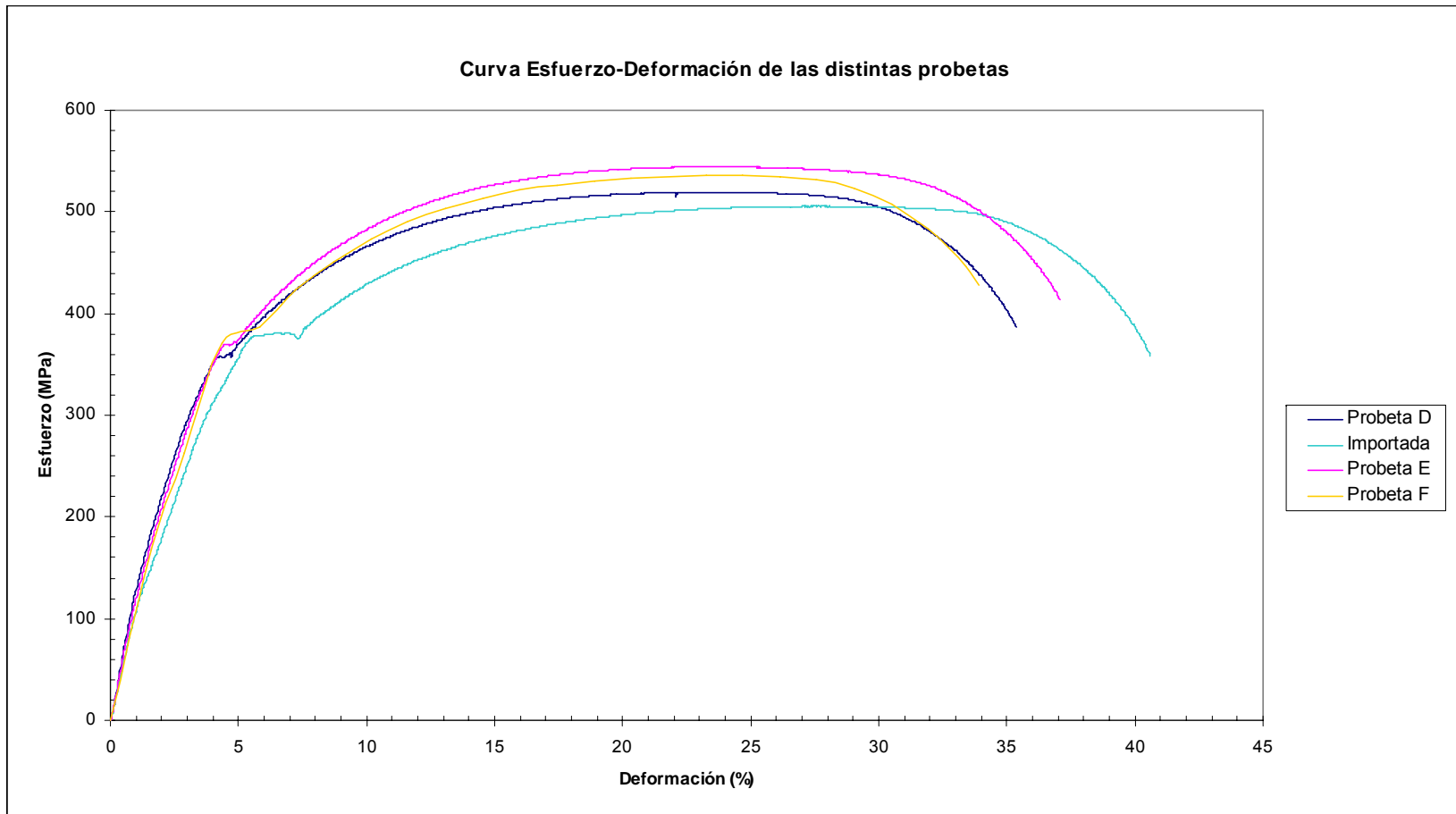
**Tabla 12.** Propiedades tensiles de las probetas ensayadas.

<b>Propiedades tensiles</b>				
Probeta	Esfuerzo de fluencia Mpa	Esfuerzo máximo Mpa	Esfuerzo de rotura Mpa	Deformación de rotura %
ASTM *	345	450	-**	18
28204 (D)	357.79	517.53	387.58	35.03
28206 (E)	370.97	546.19	416.73	36.44
28210 (F)	385.00	534.42	445.68	33.40
Importada	381.34	505.54	358.95	40.60

\* Valores mínimos reportados por la norma ASTM A 572

\*\* Valor no reportado en la norma ASTM A 572

**Figura 25.** Curva esfuerzo-deformación de las distintas probetas



La fractura característica del ensayo de tracción es una fractura Dúctil en forma de cono y copa precedida de una reducción localizada llamada estricción (ver Figura 26). La estricción empieza en el punto de inestabilidad plástica donde el incremento de la resistencia debido al endurecimiento por deformación cae para compensar el detrimento de la sección transversal. La formación del cuello introduce un estado triaxial de esfuerzos en esta región. Muchas cavidades finas se forman y bajo deformaciones continuas, estas cavidades crecen y coalescen en una grieta principal. Esta grieta se propaga en dirección perpendicular al eje de la probeta hasta aproximarse a la superficie de la misma, donde se sigue propagando a lo largo de planos cortantes aproximadamente  $45^\circ$  con el eje, dejando una apariencia de cono.

**Figura 26.** Superficie de fractura de cono y copa de la probeta 28210 (F)



En la figura se observa pequeñas microcavidades

### 3.4 ENSAYO CHARPY

**3.4.1 Probetas Longitudinales.** Reconociendo la influencia de la composición química sobre la tenacidad del material, y aun más, la influencia de elementos como el carbono, azufre y Niobio, se hace preciso determinar el modo en que estos afectan las propiedades de tenacidad (ver Tabla 13). Las mayores variaciones de energía absorbida y de temperatura de transición provienen de

cambios en el contenido de carbono y manganeso. La temperatura de transición se eleva en 14°C por cada 0.1% de aumento en el contenido de carbono y disminuye en 5°C por cada aumento de 0.1% en el manganeso. El aumento en el contenido de carbono afecta marcadamente al valor máximo de la energía absorbida y la forma de las curvas de temperatura energía. La relación Mn/C debe ser, por lo menos, igual a 3 para que la tenacidad a la entalla sea satisfactoria. Pueden alcanzarse descensos de hasta 50°C, aproximadamente, en la temperatura de transición, con relaciones Mn/C más elevadas. En la práctica no se puede exceder de valores superiores a 7, porque, si se aumenta el contenido de manganeso a más de 1.4%, se presentan complicaciones por retención de austenita y porque el carbono no puede hacerse descender del 0.2% aproximadamente para conservar las propiedades de tracción requeridas.<sup>23</sup>

**Tabla 13.** Comparación entre porcentaje de Carbono, Manganeso, Azufre, Niobio y Vanadio de las probetas ensayadas.

PARAMETRO	PROBETAS D	PROBETAS E	PROBETAS F	PROBETAS Importada
%C	0.20	0.18	0.22	0.12
% Mn	0.57	0.54	0.59	0.78
%S	0.021	0.017	0.027	0.04
%Nb-V	0.021-0.005	0.017-0.004	0.020-0.005	0.024
$3 \leq \text{Mn/C} \leq 7$	2.85	3	2.68	6.5

Teniendo en cuenta la teoría anterior y según los resultados mostrados en la Tabla 14 y Figura 27 la probeta 28210 (F) posee, a temperatura ambiente, la más baja energía absorbida debido, principalmente a cantidades altas de carbono y azufre en el acero además de una relación Mn/C inferior a 3 la cual desfavorece la resistencia a la entalla ver Tabla 13. El valor reportado no alcanza niveles muy bajos pues es compensado con la cantidad de Niobio y Vanadio, la cual es la más alta de las 4 composiciones, aumentando así la tenacidad del material.

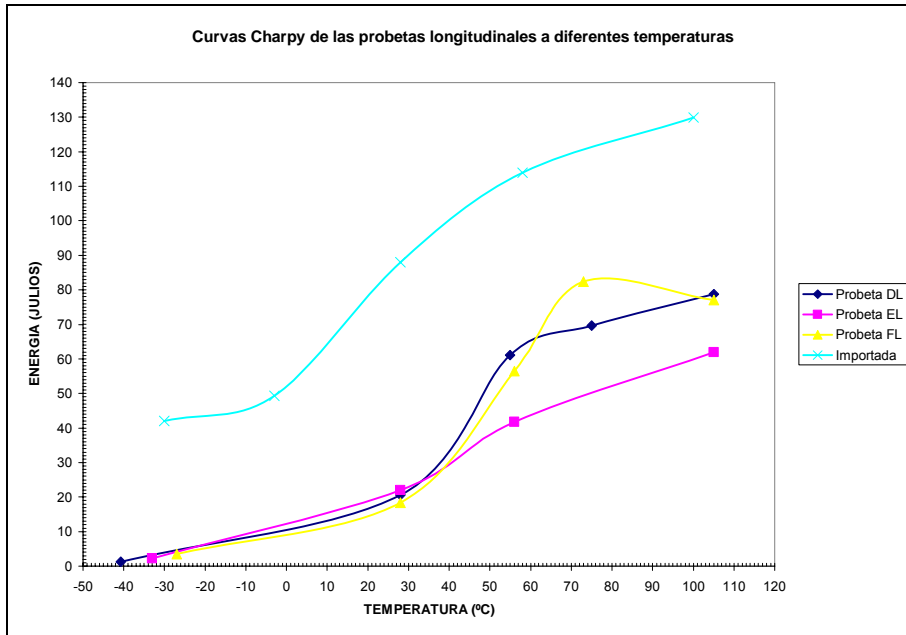
Por otra parte, la probeta Importada posee la energía mas alta a temperatura ambiente entre las 4 composiciones ensayadas, debido a su bajo porcentaje de Carbono, una alta cantidad de Niobio en su composición al igual que una relación Mn/C mayor a 3, la cual favorece la resistencia a la entalla.

Entre las 3 probetas producidas por ACASA, la probeta 28206 (E) alcanza la mayor energía absorbida a temperatura ambiente, debido a una disminución en el contenido de carbono y azufre; pero este valor no alcanza niveles mas altos porque la probeta posee la menor cantidad de Niobio y Vanadio del sistema y una relación Mn/C en el límite inferior aceptado.

**Tabla 14.** Energía absorbida a distintas temperaturas por las probetas longitudinales

Probeta	Temperatura (°C)	Energía (J)
DI	-40.7	1.32
	28	20.54
	56	61.13
	75	69.70
	105	78.74
EI	-33	2.20
	28	22.00
	56	41.82
	105	61.91
FI	-27	3.47
	28	18.34
	56	56.49
	73	82.43
	105	77.03
Importada	-30	42.06
	-3	49.39
	28	88.03
	58	113.96
	100	129.94

**Figura 27.** Curvas Charpy de probetas longitudinales a diferentes temperaturas

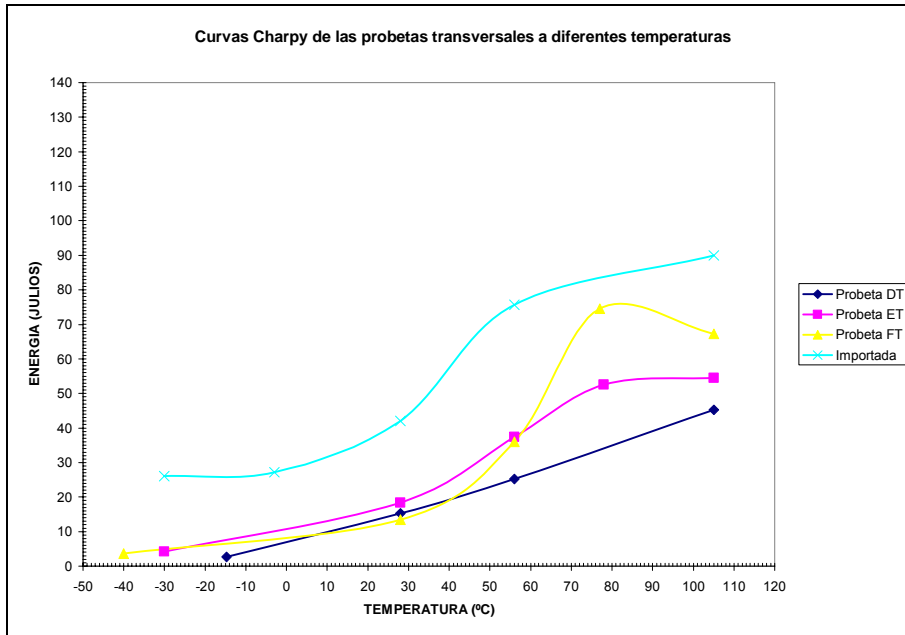


**3.4.2 Probetas transversales.** De la misma manera, el análisis anterior puede ser extensivo a las probetas transversales, donde la probeta transversal 28206 (Et) ensayada, presentó la mayor cantidad de energía absorbida a temperatura ambiente, mientras que la probeta transversal 28210 (Ft) presentó la menor cantidad de energía absorbida a la misma temperatura entre las 3 probetas producidas por el fabricante. Por otro lado, la probeta importada siguió presentando la mayor energía absorbida entre las 4 composiciones ensayadas, ver Tabla 15 y Figura 28.

**Tabla 15.** Energía absorbida a distintas temperaturas por las probetas transversales

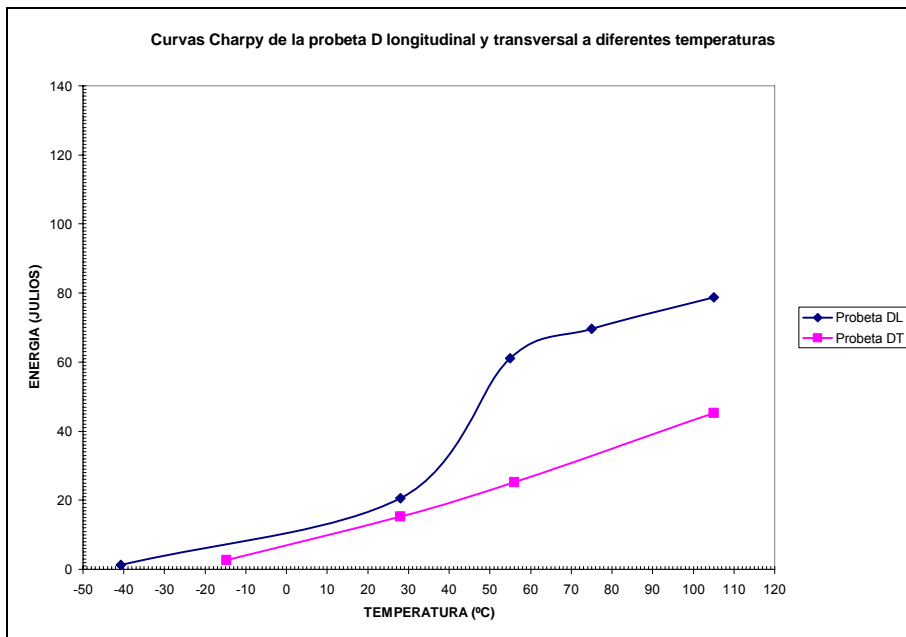
<b>Probeta</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Energía (J)</b>
Dt	-14.8	2.69
	28	15.21
	56	25.19
	105	45.24
Et	-30	4.16
	28	18.34
	56	37.42
	78	52.58
	105	54.54
Ft	-40	3.67
	28	13.42
	56	35.95
	77	74.59
	105	67.25
Importada	-30	26.12
	-3	27.19
	28	42.06
	56	75.64
	105	89.9

**Figura 28.** Curvas Charpy de probetas transversales a diferentes temperaturas

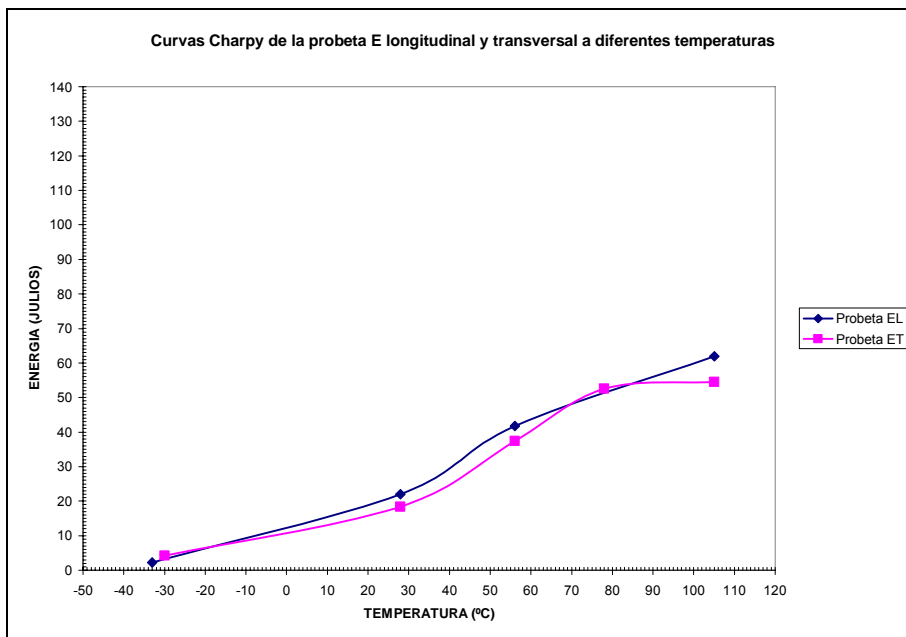


Las propiedades de impacto con entalla de los productos laminados dependen de la orientación de la probeta. Las probetas longitudinales, en las que la entalla es perpendicular a la dirección del laminado, absorben más energía debido a los grandes obstáculos que encuentra una grieta para su propagación, mientras que las probetas transversales, en donde la entalla presenta la misma orientación de la dirección del laminado, las grietas se propagaran mas fácilmente, absorbiendo menor energía. Como se observa en las Figuras 29, 30, 31 y 32, para una misma composición, las curvas charpy longitudinales y transversales mostraron diferencias entre las energías absorbidas a temperatura ambiente, siendo siempre más altas las energías de las probetas longitudinales.

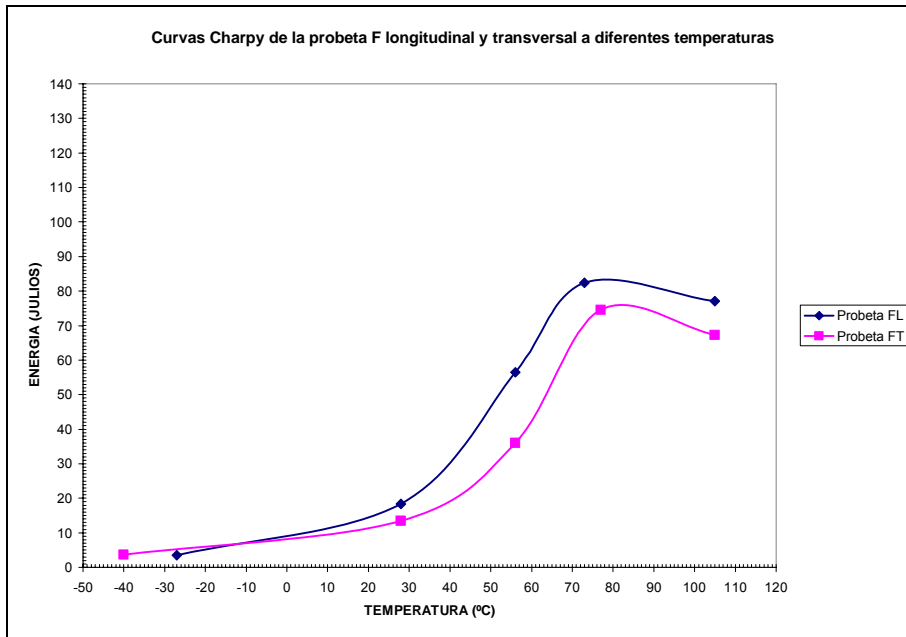
**Figura 29.** Curvas Charpy de la probeta D longitudinal y transversal a diferentes temperaturas



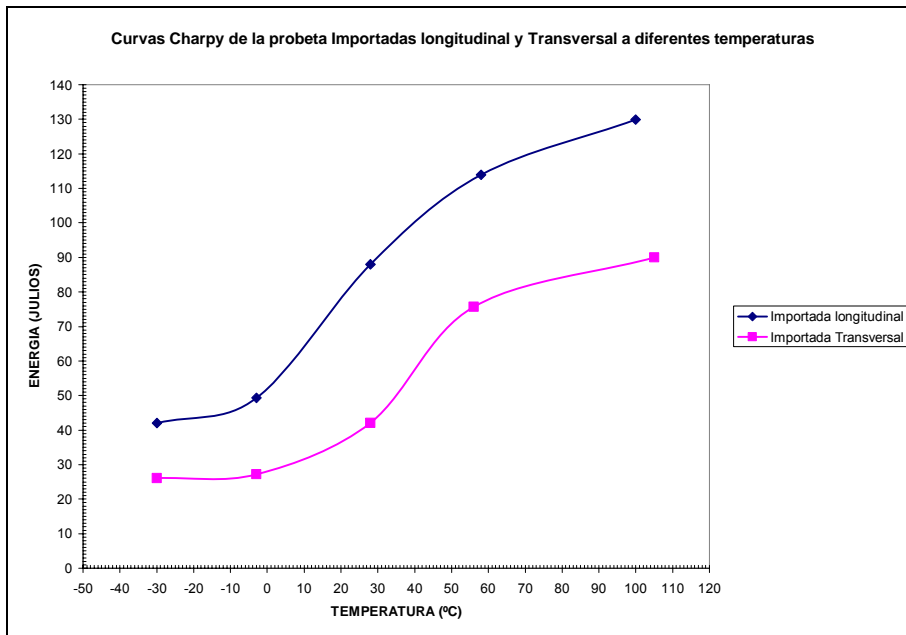
**Figura 30.** Curvas Charpy de la probeta E longitudinal y transversal a diferentes temperaturas.



**Figura 31.** Curvas Charpy de la probeta F longitudinal y transversal a diferentes temperaturas.

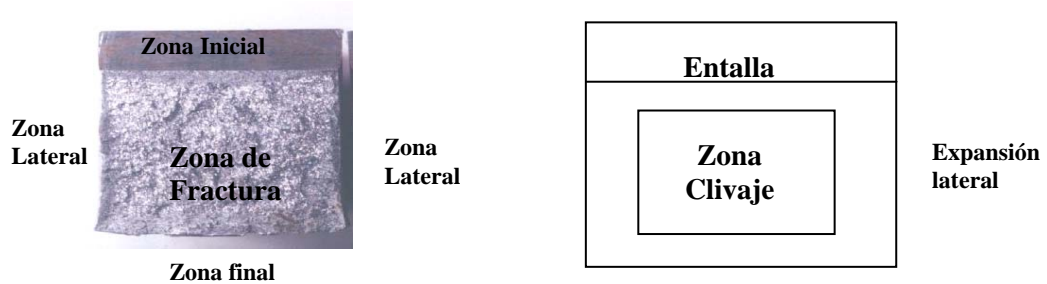


**Figura 32.** Curvas Charpy de la probeta importada longitudinal y transversal a diferentes temperaturas.



**3.4.3 Análisis de Fractura.** Para realizar el análisis de la superficie de fractura de las probetas ensayadas, se concentraron las observaciones en la zona de fractura de acuerdo con la Figura 33.

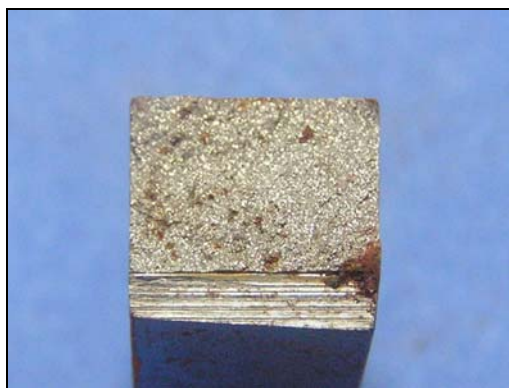
**Figura 33.** Esquema de zonas de fractura, en la superficie de una probeta



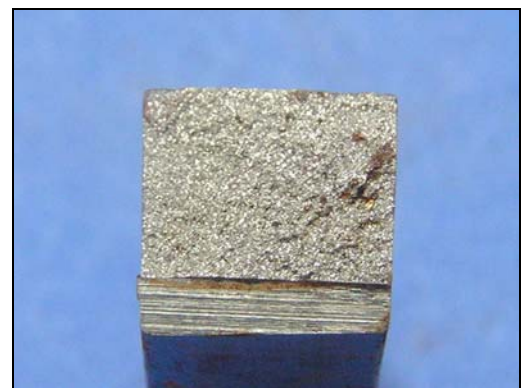
Tomada de la Norma ASTM E 23

La zona de fractura describe una pequeña deformación plástica (Dúctil), que surge a partir del impacto del martillo, la cual disminuye directamente con la temperatura de enfriamiento del ensayo. Para aquellas probetas impactadas a temperatura por debajo de los cero grados centígrados, se encontró en la superficie de fractura una morfología de falla 100% frágil, caracterizadas por una apariencia granular y brillante debido a la reflexión de luz en la superficie de planos de clivaje (ver Figuras 34 y 35).

**Figura 34.** Superficie de fractura de la probeta 28204 longitudinal (DL) de ensayo charpy a  $-40.7^{\circ}\text{C}$



a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

Para aquellas probetas impactadas a temperatura ambiente (28°C) se encontró una superficie de fractura mixta: Dúctil y Frágil. La porción frágil siguió conservando las mismas características de color y apariencia de las encontradas en probetas ensayadas a temperatura por debajo de los 0°C. La porción dúctil se caracterizó por una apariencia fibrosa y gris producida por esfuerzos cortantes que promueven el deslizamiento de los planos activos y exhibe un alto grado de deformación. Se encontraron diferencias entre las proporciones dúctil y frágil de las diferentes composiciones ensayadas, aunque cabe destacar que la proporción frágil era de un tamaño superior a la dúctil como se observa en las Figura 38.

**Figura 35.** Superficie de fractura de la probeta 28204 longitudinal (DL) de ensayo charpy a 28°C



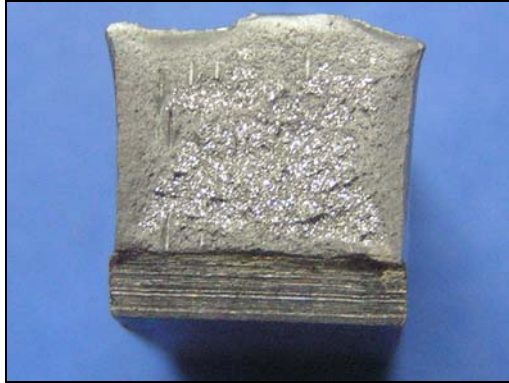
a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6X

Para aquellas probetas impactadas a temperaturas comprendidas entre 55 y 75°C, se encontró en la superficie de fractura una morfología de falla mixta: Dúctil y frágil, cuyas proporciones difieren entre probetas de diferente composición e igual temperatura. Al aumentar la temperatura de 55 a 75°C, la porción dúctil aumentaba de manera significativa sobre la frágil (ver figuras 39, 40 y 41). La parte Dúctil siguió caracterizándose por una apariencia fibrosa y gris. La parte Frágil presentaba las mismas características de aquellas impactadas a temperatura ambiente e inferiores.

**Figura 36.** Superficie de fractura de la probeta 28206 longitudinal (EL) de ensayo charpy a 55 °C



a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

**Figura 37.** Superficie de fractura de la probeta 28210 longitudinal (FL) de ensayo charpy a 55 °C



a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

**Figura 38.** Superficie de fractura de la probeta 28210 longitudinal (FL) de ensayo charpy a 73 °C



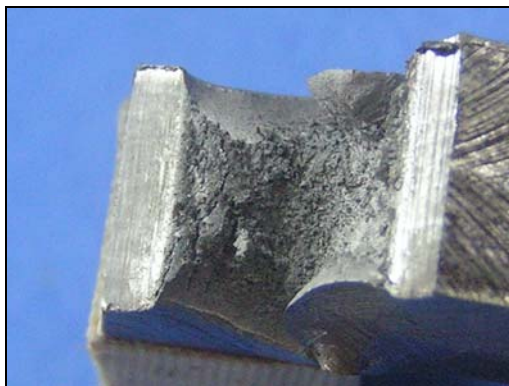
a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



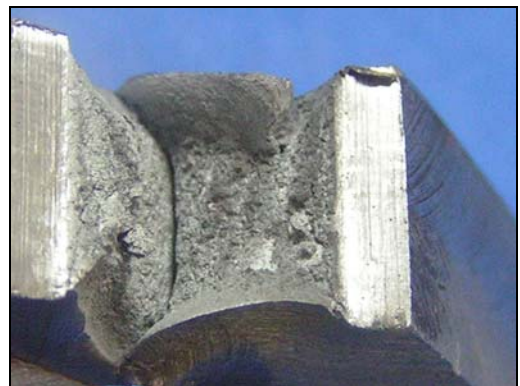
b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

Para aquellas probetas impactadas a temperaturas cercanas y superiores a los 100°C, se encontró en la superficie de fractura una morfología de falla 100% dúctil, que presentaban características similares a las anteriormente destacadas (ver Figuras 39 y 40).

**Figura 39.** Superficie de fractura de la probeta importada longitudinal (IL) de ensayo charpy a 100 °C



a) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

**Figura 40.** Superficie de fractura de la probeta 28206 longitudinal (EL) de ensayo charpy a 105 °C



a) Parte izquierda de la probeta, 2.6 X aumentos



b) Parte izquierda de la probeta, aumentos 2.6 X

**3.4.4 Temperatura de Transición Dúctil- Frágil.** Para determinar la temperatura de Transición Dúctil-Frágil del las diferentes composiciones del acero ASTM A 572 Gr. 50 según norma ASTM E 23, es preciso determinar el porcentaje de clivaje a cada una de las temperaturas a las cuales fue realizado el ensayo, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de cortante} + \text{Porcentaje de clivaje} = 100\% \quad (10)$$

Por lo tanto, es necesario en primer lugar determinar el porcentaje de cortante para cada temperatura.

- **Determinación de la proporción de superficie de fractura cortante.** La proporción de fractura cortante corresponde al mecanismo correspondiente a la fractura dúctil. Los métodos de apariencia de fractura están basados en el concepto de que 100% de porcentaje de cortante (Fractura Dúctil) ocurre por encima del rango de temperatura de transición Dúctil-Frágil y el 100% de porcentaje de clivaje (Fractura Frágil) por debajo de este rango. Según la norma ASTM E 23 existen diversos métodos que pueden ser usados para determinar el



**Tabla 16.** Porcentaje cortante y de clivaje en probetas longitudinales del ensayo Charpy.

<b>Probeta</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>A Mm</b>	<b>B Mm</b>	<b>% cortante</b>	<b>% clivaje</b>
DI	-40.7	10	8	0	100
EI	-33	10	8	0	100
FI	-27	10	8	0	100
Importada	-30	8.38	7.20	26	74
Importada	-3	6.42	5.07	59	41
DI	28	8.4588	6.93	26	74
EI		8.4327	5.8243	36	64
FI		9.7580	6.4320	20	80
Importada		4.60	2.03	89	11
DI	56	4.626	0.923	94	6
EI		6.2786	4.9064	62	38
FI		5.4463	2.6187	83	17
Importada	58	0	0	100	0
DI	75	1.2329	0.7128	99	1
EI	-	-	-	-	-
FI	73	5.889	1.854	85	15
Importada	-	-	-	-	-
DI	105	0	0	100	0
EI		0	0	100	0
FI		0	0	100	0
Importada	100	0	0	100	0

**Tabla 17.** Porcentaje cortante y de clivaje en probetas Transversales del ensayo Charpy

<b>Probeta</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>A Mm</b>	<b>B Mm</b>	<b>% cortante</b>	<b>% clivaje</b>
Dt	-14.8	10	8	0	100
Et	-30	10	8	0	100
Ft	-40	10	8	0	100
Importada	-30	8.22	7.58	25	75
Importada	-3	7.42	6.43	39	61
Dt	28	8.0997	6.1100	40	60
Et		7.2484	5.2195	56	44
Ft		6.522	8.0321	35	65
Importada		6.76	3.89	65	35
Dt	56	6.3484	4.7736	59	41
Et		7.6182	3.2281	72	28
Ft		6.2824	4.6298	63	37
Importada		0	0	100	0
Dt	-	-	-	-	-
Et	78	4.8551	1.9235	89	11
Ft	77	6.4303	2.3278	80	20
Importada	-	-	-	-	-
Dt	105	0	0	100	0
Et		0	0	100	0
Ft		0	0	100	0
Importada		0	0	100	0

Diversas definiciones de temperaturas de transición son obtenidas de gráficas de apariencia de fractura vs temperatura como las que se muestra en la Figura 42 (ver Anexo E). Para determinar la temperatura de transición dúctil frágil del acero

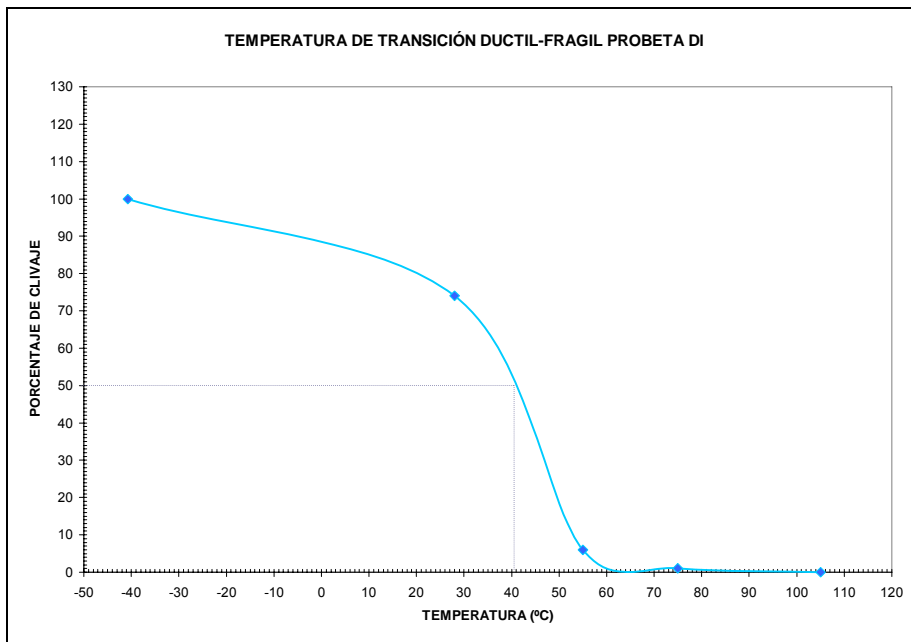
ASTM A 572 Gr. 50 se utilizaron dos criterios: temperatura de transición de la apariencia de fractura (FATT) y el criterio de la energía absorbida.

El criterio de temperatura de transición de la apariencia de la fractura (FATT) establece la base de la temperatura de transición en el 50% de clivaje de la curva apariencia de fractura vs temperatura obteniéndose los resultados de las Tablas 18 y 19. En base a este criterio el material posee, a esta temperatura, una morfología de falla 50% dúctil-50% frágil, es decir, existe un 50% de posibilidad de una falla catastrófica en el material a esta temperatura. Se observa que la temperatura de transición de las probetas producidas por el fabricante se encuentran por encima de los 40°C lo cual es indicativo que al someterse el material a temperatura menores a los 40°C, éste tenderá a fragilizarse y se producirá inevitablemente la falla del mismo. Este criterio ha sido muy utilizado debido a que correlaciones hechas del ensayo Charpy y fallas en servicio han demostrado que menos de 70% de clivaje en apariencia de fractura indica una alta probabilidad de la no ocurrencia de fractura sobre y por encima de esta temperatura.

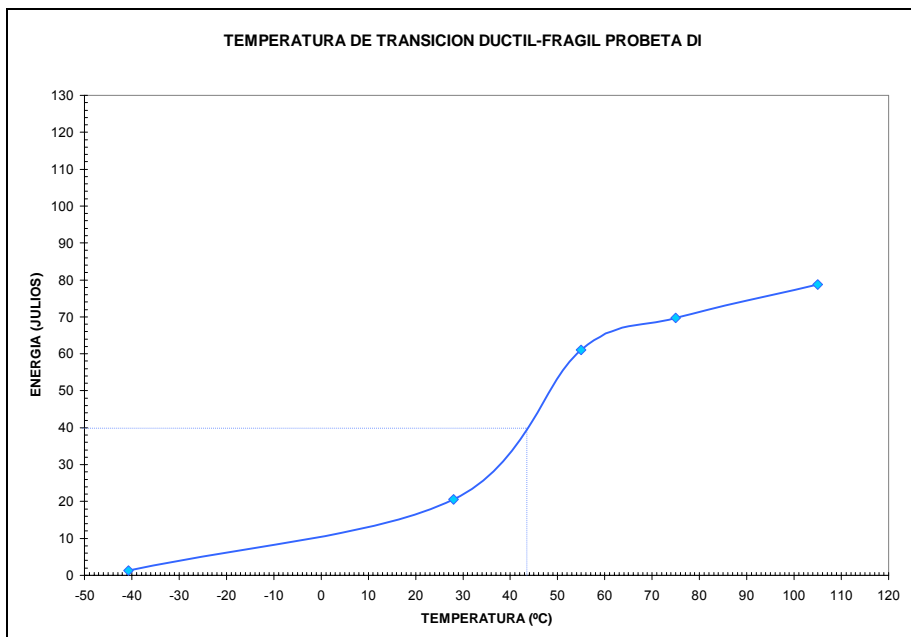
El criterio de la energía establece la base de la temperatura de transición en la mitad de energía absorbida en las curvas energía absorbida vs. Temperatura (ver gráfica 43). Según este criterio, las temperaturas de transición Dúctil-Frágil de las probetas producidas por el fabricante se encuentra por encima de los 39°C.(ver tablas 18 y 19)

Al comparar los temperaturas de transición obtenidas de los dos criterios utilizados, observamos algunas diferencias mínimas en los resultados.

**Figura 42.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta DI



**Figura 43.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta DI



Por otro lado, al observar las curvas y la apariencia de la fractura de las probetas importadas con las producidas por ACASA, (anexo E), se detalla que, la muestra importada, a temperatura ambiente, presenta una mayor proporción dúctil respecto al porcentaje de clivaje, indicando que el 50% de clivaje correspondería a una temperatura de transición dúctil-Frágil por debajo de la temperatura ambiente, mientras las muestras producidas por el fabricante nacional a temperatura ambiente se caracterizan por presentar altos porcentajes de clivaje. Cuando las probetas producidas por el fabricante se sometan a una temperatura de 28°C, su morfología se caracterizará por la fragilización del material, mientras que la probeta importada no tendrá problemas en su vida en servicio. Las diferencias en los valores de temperaturas de transición dúctil-frágil entre las muestras de acero importado y las producidas por el fabricante, tienen su origen en las diferencias de composición química: el acero producido por el fabricante posee la menor cantidad de carbono, la mayor cantidad de manganeso y cantidades altas de Niobio entre las muestras ensayadas, siendo la disminución del primero y el aumento del segundo los factores que mas disminuyen la temperatura de transición. Cabe también destacar que el acero importado posee una relación Mn/C superior a 3, la cual como se había citado disminuye la temperatura de transición. Los aceros producidos por ACASA tienen relaciones de Mn/C inferiores a 3.

**Tabla 18.** Temperatura de Transición dúctil-frágil en probetas longitudinales

<b>Temperatura Transición Dúctil – Frágil para probetas longitudinales</b>				
<b>Métodos</b> \ <b>Probetas</b>	<b>28204 DI</b>	<b>28206 EI</b>	<b>28210 FI</b>	<b>Importada</b>
Temperatura de transición de apariencia fractura (FATT)	41°C	43°C	43°C	-11
Temperatura de transición al 50% energía absorbida	43°C	40°C	44°C	-14

**Tabla 19.** Temperatura de Transición dúctil-frágil en probetas transversales

<b>Temperatura Transición Dúctil – Frágil para probetas transversales</b>					
<b>Métodos</b>	<b>Probetas</b>	<b>28204 Dt</b>	<b>28206 Et</b>	<b>28210 Ft</b>	<b>Importada</b>
Temperatura de transición de apariencia fractura (FATT)		42°C	39°C	45°C	11
Temperatura de transición al 50% energía absorbida		44°C	41°C	55°C	11

El tamaño de grano también tiene efecto en la temperatura de transición: Un incremento de un número ASTM en el tamaño de grano provoca una disminución significativa en el valor de temperatura de transición. Las probetas longitudinales presentaron mayores números ASTM de tamaño de grano que las probetas transversales (ver tablas 9 y 10) y los valores de temperatura de transición de las probetas longitudinales, para ambos criterios, son menores a los de las probetas transversales (ver tablas 18 y 19).

## CONCLUSIONES

- El presente estudio mostró que el acero ASTM A 572 Gr 50 producido por ACERIAS DE CALDAS S.A, se encuentra constituido por una estructura ferrítico-perlítica, de tamaños de granos finos debido a las adiciones de Niobio y Vanadio los cuales refinan el grano afectando directamente las propiedades mecánicas. El acero importado presentó, al igual, una estructura compuesta por ferrita y perlita de tamaños de granos finos, debido a las adiciones de niobio lo cual confirma que éste es más efectivo al refinar el tamaño de grano que el vanadio.
- La composición química de las muestras ensayadas se encuentra entre los rangos admitidos y superan los mínimos requerimientos tensiles establecidos en la norma ASTM A 572 Gr 50.
- La probeta importada, con las mayores cantidades de manganeso y las menores cantidades de carbono presenta la menor temperatura de transición dúctil-frágil entre las muestras ensayadas lo que ratifica que estos elementos, producen las variaciones más significativas en dicha temperatura.
- La probeta importada presentó, a temperatura ambiente, una morfología de fractura dúctil en mayor proporción que las producidas por ACASA. Cuando ésta sea sometida a temperaturas alrededor de los 28°C, no presentará problemas en su vida en servicio, mientras que las probetas producidas por el fabricante nacional al ser sometidas a esta misma temperatura, se caracterizarán por la fragilización del material.
- De las 3 composiciones producidas por ACASA no se obtienen resultados satisfactorios de energía absorbida en impacto para ser utilizadas en estructuras sometidas a bajas temperaturas, debido principalmente a que las probetas de

estas composiciones presentan valores de energía absorbida menores a 22 J a temperatura ambiente, dando como resultado una temperatura de transición Dúctil-Frágil por encima de los 28°C, lo cual puede conllevar a fallas catastróficas por la naturaleza de la propagación de grietas en materiales frágiles.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda aumentar los contenidos de Manganeso, y disminuir el contenido de carbono del acero con el fin de aumentar la resistencia al impacto a bajas temperaturas, al igual que tener más control sobre los elementos que pudiesen formar precipitados.
2. Gracias a los resultados obtenidos en este trabajo, se realizó una nueva colada (29237), a la cual, al realizar ensayos preliminares, se encontró mejores resultados de energía absorbida a temperatura ambiente, debido principalmente a un bajo contenido de Carbono y alto contenido Manganeso; aunque presenta buenas propiedades de tenacidad, el bajo contenido de carbono puede afectar las propiedades del acero en tracción disminuyendo la carga máxima permisible. Se recomienda realizar un estudio completo a dicha colada.
3. La falta de muestreo representativo puede conllevar a la mala interpretación y obtención de resultados, por lo tanto se recomienda para próximas investigaciones aumentar el número de probetas para realizar una aproximación más real del ensayo Charpy.
4. Se sugiere complementar el estudio realizando pruebas de fatiga y torsión debido a que estas propiedades son importantes para predecir la vida en servicio del material a las condiciones a las cuales estará expuesto.

## BIBLIOGRAFÍA

- AKBEN, M; BACROIX, B and JONAS, J. Effect Of Vanadium and Molybdenum addition on high temperature recovery, recrystallization and precipitation behavior of Niobium-Based microalloyed steels. En: Acta Metallurgica. Vol. 31 (1983); p. 161-174 <sup>(13)</sup>
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Irons, steels and High-Performance Alloys. 10 ed. United States of America : ASM, 1990. v.1, p. 389-423 <sup>(16)</sup>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for high-strength low-alloy Columbium-Vanadium structural steel. United States : ASTM, 2004. 4p. : il. (ASTM A 572) <sup>(17)</sup>
- \_\_\_\_\_. Standard test methods for determining average grain size. United States : ASTM, 1996. 25p. : il. (ASTM E 112) <sup>(19)</sup>
- \_\_\_\_\_. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. United States : ASTM, 2002. 27p. : il. (ASTM E 23) <sup>(22)</sup>

- \_\_\_\_\_ . Standard test methods for tension testing of metallic materials. United States : ASTM, 2003. 23p. : il. (ASTM E 8) <sup>(21)</sup>
- ASKELAND, Donald R. La ciencia e ingeniería de los materiales. Méjico : Grupo Editorial Iberoamérica, 1985 <sup>(18)</sup>
- BALDOVINO NAVARRO, Patricia et al. Evaluación de la Soldabilidad de los aceros estructurales ASTM A-36, ASTM A572 Grado 50, ASTM A588 Grado B y sus combinaciones según código AWS D1.1. Bucaramanga, 2000. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Soldadura. <sup>(10)</sup>
- BARAJAS BOHORQUEZ, Lincoln y TRISTANCHO REYES, José. Determinación de fases, microconstituyentes y tamaño de grano en aceros hipoeutectoides en estado normalizado y/o recocido mediante análisis digital de imágenes. Bucaramanga, 1998. Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. <sup>(11)</sup>
- BJORHOVDE, Reidar. Development and use of high performance steel. En: Journal of Constructional Steel Research. Vol. 60 (2004); p. 393-400 <sup>(14)</sup>

- CARSI, P., PEÑALBA, F. Y GUTIERREZ, I. 1993. J. Mater. Sci. (28) p.6-40. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(5)</sup>
- DIETER, George. Mechanical metallurgy. Londres: Mc Graw Hill, 1988.
- FAWZY, Samuel. Interrelations of Cooling Rate, Microstructure, and Mechanical Properties in four HSLA Steels. En: Metallurgical Transactions A. Vol. 15A (oct 1984); p.1807-1817 <sup>(9)</sup>
- GLADMAN, T. 1988. Proc. Information Day on Microalloyed Engineering Steel. Comision of the E.C. Dusseldorf, p. 3. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(3)</sup>
- GREAVES, R. H. y WRIGTON h. Metalografía microscópica práctica. Bilbao: Editorial Urmo, 1966. <sup>(20)</sup>

- HALL, E.D. 1951. Proc. Phys. Soc. Serie B; (64) p.747. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(1)</sup>
- JHAZI, M and EGHBALI, B. The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of two microalloyed steels. En: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 113 (2001); p. 594-598 <sup>(12)</sup>
- KHALID, F et al. Role of Ferrite/Pearlite banded structure and segregation on mechanical properties of microalloyed hot rolled steel. En: Materials Science and Technology. Vol 15 (oct 1999); p. 1209 <sup>(15)</sup>
- KOUWENHOVEN, H. 1969. J. Trans. ASM., (62) P. 437. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(4)</sup>
- NARITA, K. 1978. Trans. Iron Steel Inst. Jpn. (28) p. 6-40. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(6)</sup>

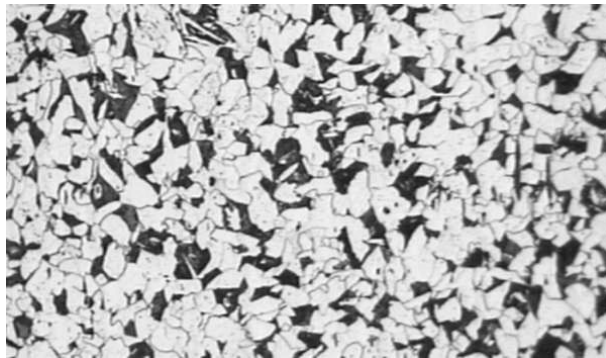
- NAYLOR, D.L. 1989. Conf. Report on Microalloyng Engineering Steels. Metals and Materials, Enc, p. 40. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(8)</sup>
- PETCH, N.J. 1953. J. Iron Steel Inst. (174) p. 25. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(2)</sup>
- REYNOLDS, J.H. 1992. ESSC Project 7210 MA / 816 Final Report. Citado por: SAENZ, L, CASTRO C, y GOTA J. Evaluación de las Propiedades Mecánicas de un acero microaleado al vanadio sometido a un tratamiento térmico de normalizado. (2005); p.1-8 <sup>(7)</sup>

## ANEXO A

### METALOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

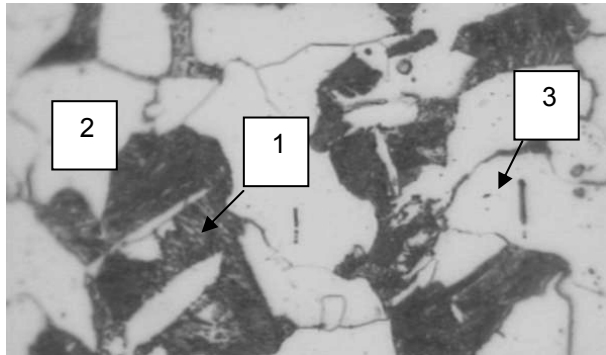
#### 1.1 METALOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES 28204 (D)

**Figura A 1.** Metalografía probeta 28204 transversal ( Dt )



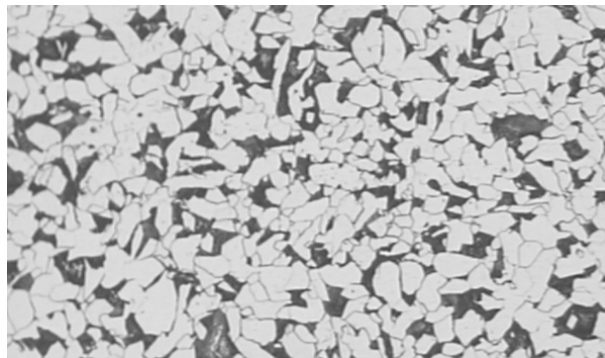
Estructura general perlita ferrita. Ataque: Nital 2%, Aumentos 100 X

**Figura A 2.** Metalografía probeta 28204 transversal ( Dt )



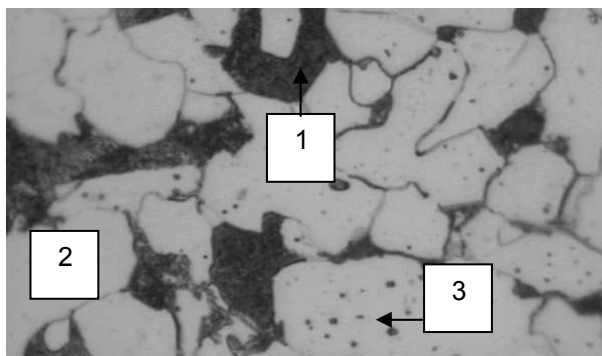
Aumentos 500X, Ataque: Nital 2%, 1) Perlita, 2) Ferrita 3) Partículas de precipitados.

**Figura A 3.** 100 X Metalografía probeta 28204 longitudinal ( DI )



Estructura general perlita ferrita. Ataque: Nital 2%, Aumentos 100 X

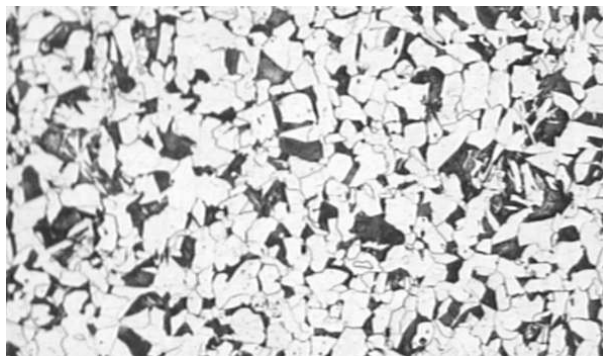
**Figura A 4.** Metalografía probeta 28204 longitudinal ( DI )



Aumentos 500x, Ataque: Nital 2%, 1) Perlita, 2) Ferrita 3) Partículas de precipitado.

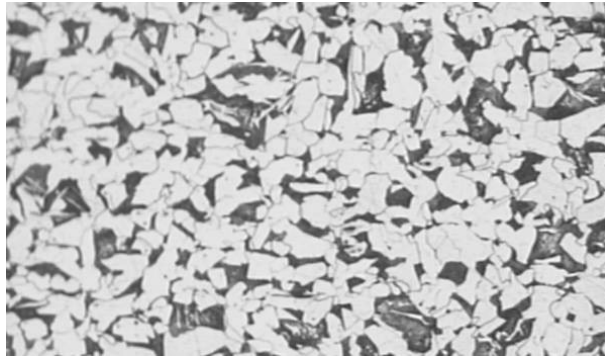
## 1.2 METALOGRAFIAS DE LAS PROBETAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES 28206 (E)

**Figura A 5.** Metalografía probeta 28206 transversal ( Et )



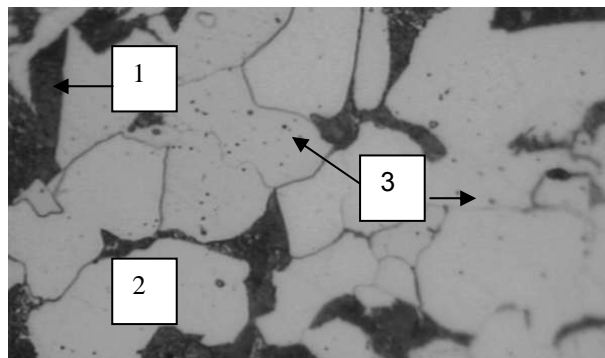
Estructura general ferrita Perlita. Ataque: Nital 2%, aumentos 100 X

**Figura A 6.** Metalografía probeta 28206 longitudinal ( El )



Estructura general perlita ferrita. Ataque: Nital 2%, Aumentos 100 X

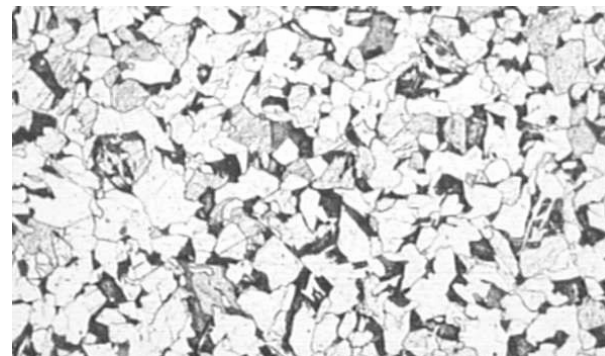
**Figura A 7.** Metalografía probeta 28206 longitudinal ( El )



Aumentos 500x, Ataque: Nital 2%, 1) Perlita, 2) Ferrita 3) Partículas de precipitado.

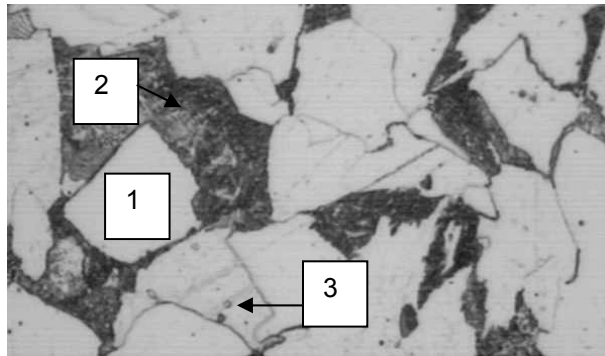
### **1.3 METALOGRAFIAS DE LAS PROBETAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES 28210 (F)**

**Figura A 8.** Metalografía probeta 28210 transversal ( Ft )



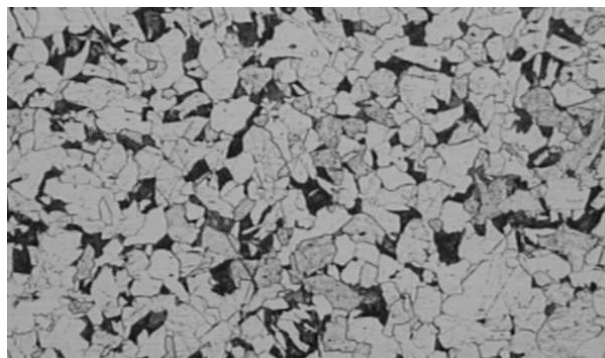
Aumentos 100x, Ataque: Nital 2% Estructura general perlita ferrita

**Figura A 9.** Metalografía probeta 28210 transversal ( Ft )



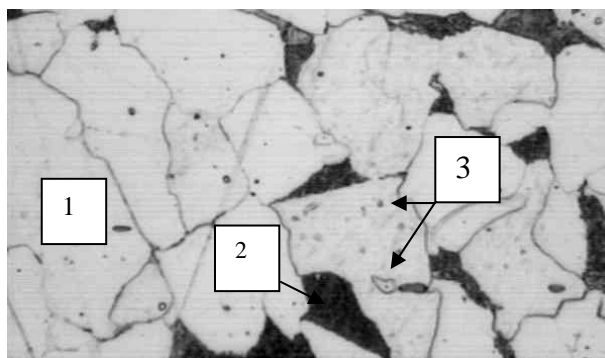
Aumentos 500X, Ataque: Nital 2% 1) Ferrita 2)Perlita 3)Partículas de precipitado.

**Figura A 10.** Metalografía probeta 28210 longitudinal ( FI )



Aumentos 100X, Ataque: Nital 2% Estructura Ferrita Perlita

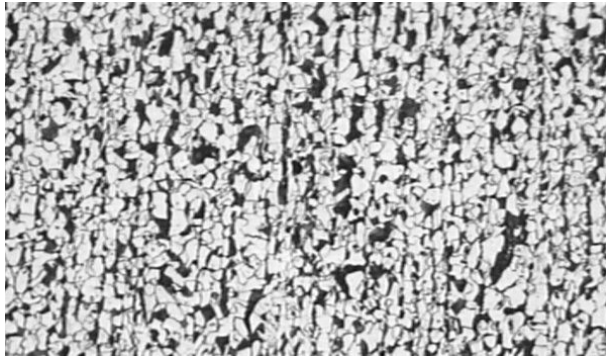
**Figura A 11.** Metalografía probeta 28210 longitudinal ( FI )



Aumentos 500 X, Ataque: Nital 2% 1) Ferrita 2) Perlita 3) Partículas de precipitado.

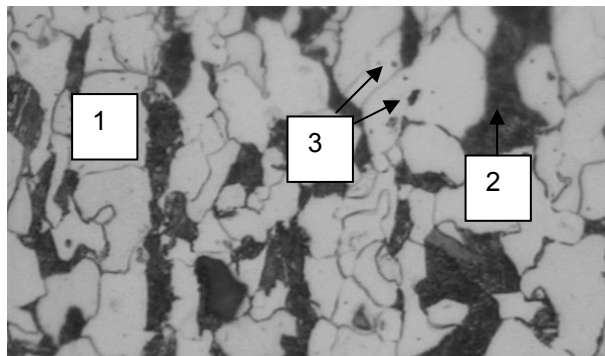
## 1.4 METALOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS IMPORTADAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES

**Figura A 12.** Metalografía probeta importada transversal ( It )



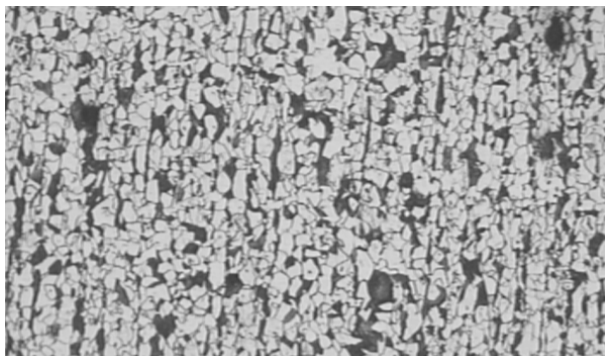
Aumentos 100x, Ataque: Nital 2% Estructura general perlita ferrita

**Figura A 13.** Metalografía probeta importada transversal ( It )



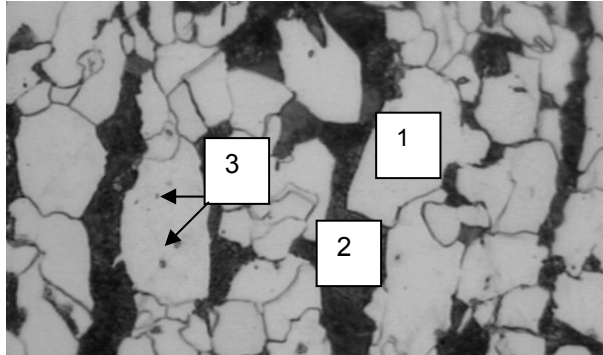
Aumentos 500x, ataque: Nital 2% 1) Ferrita 2) Perlita 3) partículas de precipitados

**Figura A 14.** Metalografía probeta importada longitudinal ( IL )



Aumentos 100x, ataque: Nital 2% Estructura general ferrita perlita

**Figura A 15.** Metalografía probeta importada longitudinal ( IL )




Aumentos 500x, ataque: Nital 2% 1) Ferrita 2) Perlita 3) Partículas precipitadas

## ANEXO B

### CERTIFICADOS DE CALIDAD

**Figura B 1.** Certificado de calidad de las probetas suministradas por el fabricante



**ACASA**  
AGENCIAS DE CALIDAD S.A.

### CERTIFICADO DE CALIDAD

No. 22990  
 FECHA Jueves, 09 de Febrero de 2006

CLIENTE

PROYECTO ACASA ULIS

CIUDAD

BUCARAMANGA

REMISION

I

DATOS DE LA COLADA			ENSAYOS MECÁNICOS		COMPOSICIÓN QUÍMICA %												
COLADA #	PERFIL Pulg	CLASE NORMA	FLUENCIA Pul	RESISTENCIA Pul	ALARG. %	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Sn	V	Nb	Ceq
28210	ANGULO 3 * 3/8	A572 G-50 NTC 1985	54206	79887	23	0.22	0.56	0.17	0.027	0.007	0.11	0.09	0.21	0.014	0.005	0.02	0.37
28206	ANGULO 75 * 7mm	A572 G-50 NTC 1985	53725	74099	22.5	0.18	0.54	0.15	0.017	0.009	0.1	0.08	0.18	0.013	0.004	0.017	0.32
28204	ANGULO 3 * 3/16	A572 G-50 NTC 1985	54320	79105	20	0.2	0.57	0.19	0.021	0.009	0.1	0.17	0.23	0.015	0.005	0.021	0.35




OBSERVACIONES:

*Alexander López Cruz*

**Alexander López Cruz**  
Jefe Control de Procesos

www.acasa.com.co  
 Km 2 Via Termaltes La Enea · Conmutador +57 6 874 69 50 · Fax +57 6 874 77 99 · Apartado Aéreo 2299  
 E-mail: acasa@acasa.com.co · Nit. 800.046.847-1 · Manizales · Colombia

**Figura B 2.** Certificado de calidad de la probeta importada suministradas por el fabricante

<b>CERTIFICADO DE CALIDAD</b>		Ref. Nr.: 002238/2002 Pag.: 01
 Companhia Siderúrgica Belo Horizonte		Size (mm): 5 X 5 X 1/2 POL Order Number: 494304 Grade: ASTM A572 GR50
Customer: FABRICA DE ESTRUTURAS SADE ELECTRICAS S.A. Product: EQUAL ANGLES 5" x 5" x 1/2" x39,4Et ASTM A572 G50 Purchase Order: P0710502		
Heat Nr.	Weight(t)	YIELD POINT TENSILE STRENGTH & ELONGATION % C % Mn % Si % P % S % Nb
	MPa	
	MPa	
2735900	39 78,936	419 546 21.00 0.1200 0.7800 0.1800 0.0250 0.0400 0.0240
2741300	14 28,336	402 519 22.00 0.1200 10.000 0.2100 0.0270 0.0380 0.0340
TOTA	53 107,272	
Heat % Cu % Cr % Ni % Sn % Mo 2735900 0.1600 0.0600 0.0500 0.0130 0.0110 2741300 0.1300 0.0800 0.0500 0.0200 0.0150		
Remarks: We hereby certify that the material herein listed was produced, inspected, tested and approved in accordance with the standard or the specification required.		
Date: 28/JUN/2002 Approved by:  IVAN OLIVEIRA DE MEDEIROS Companhia Siderúrgica Belo Horizonte		

## ANEXO C

### PLANOS DE LAS PROBETAS DE TRACCIÓN E IMPACTO BAJO NORMA ASTM

**Figura C 1.** Plano de la probeta para ensayo de tracción bajo norma ASTM E 8

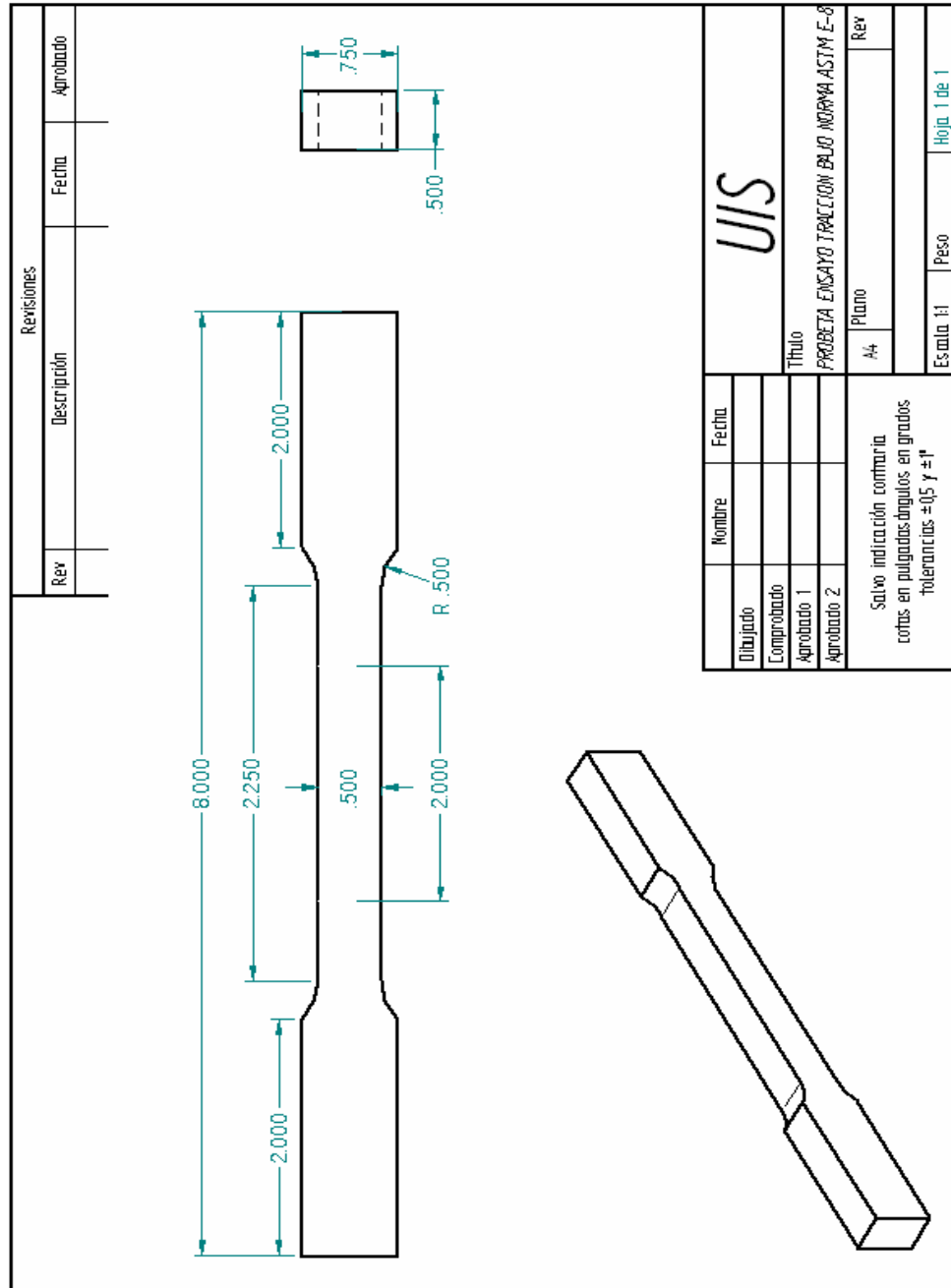
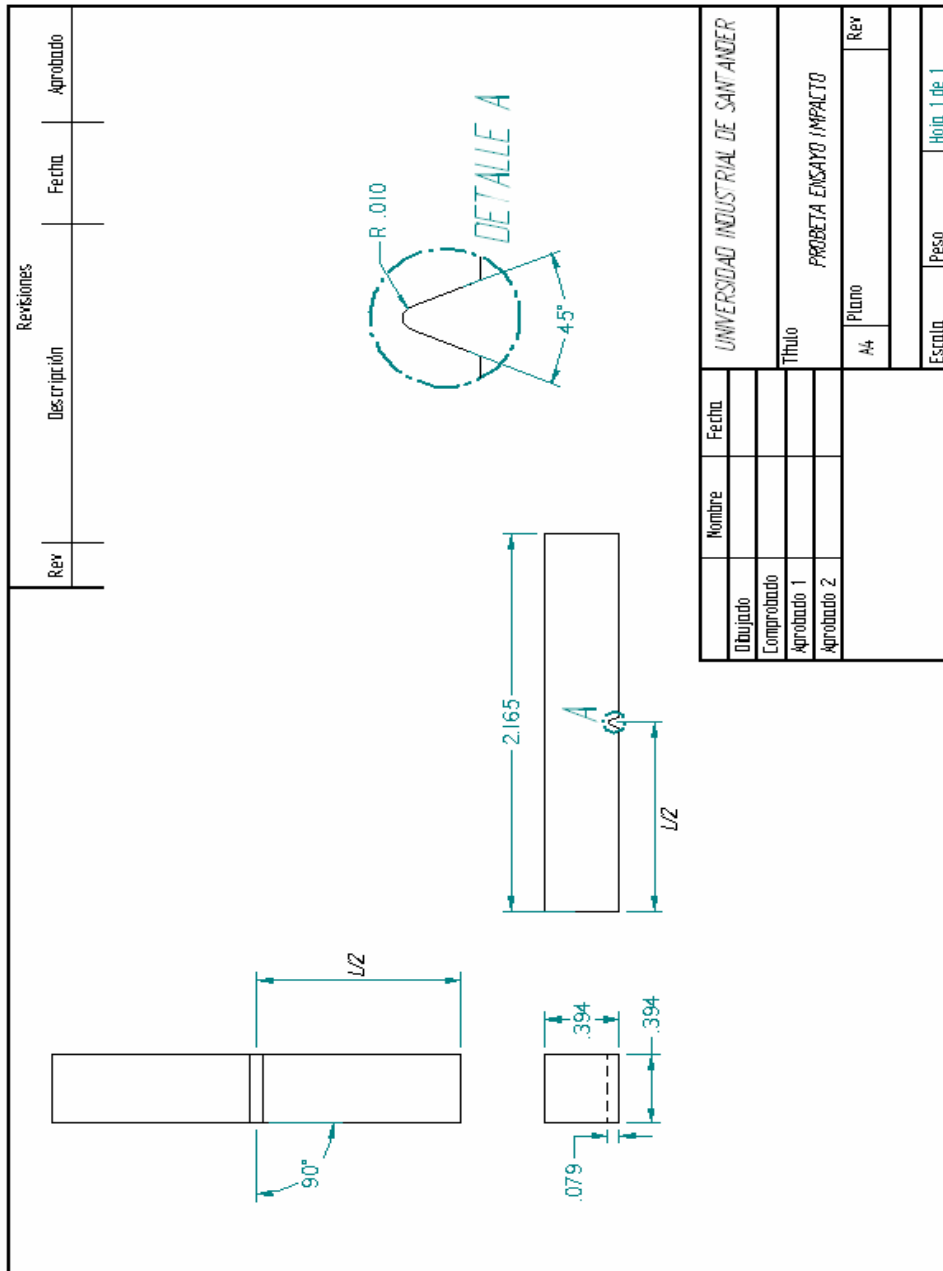


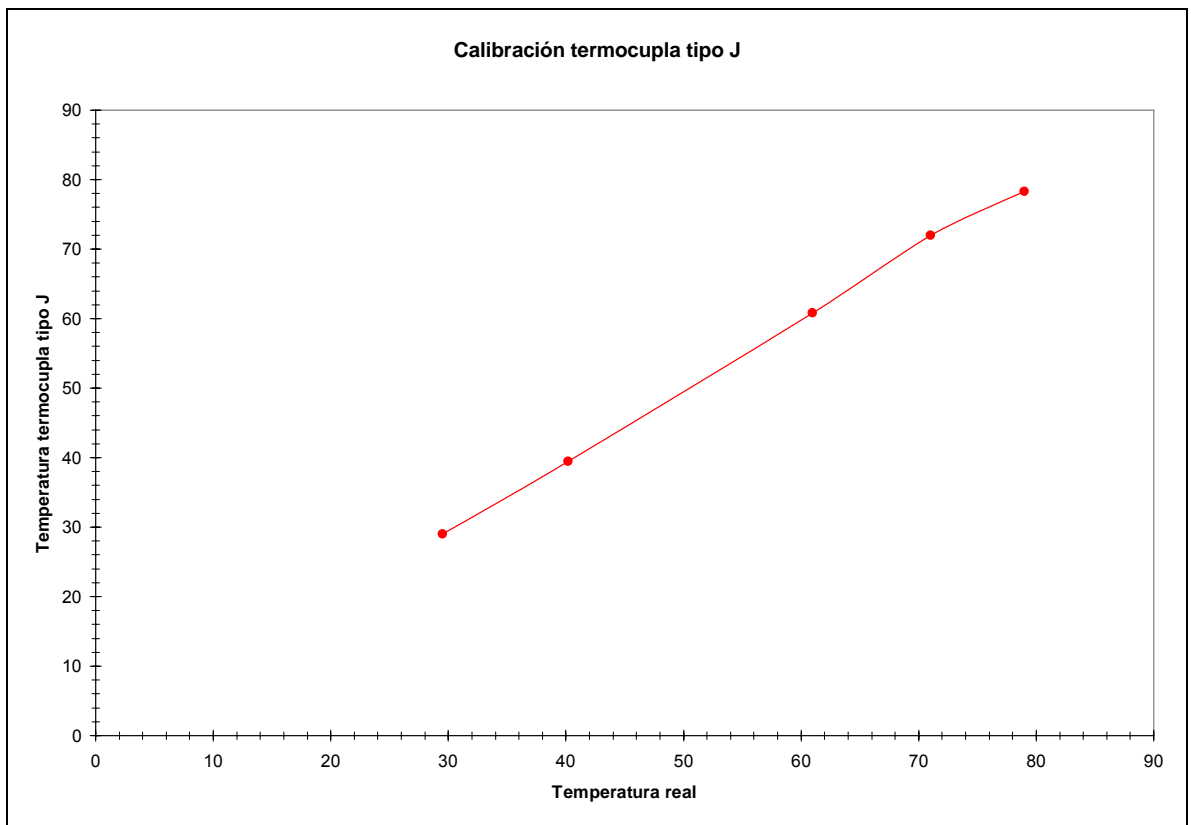
Figura C 2. Plano de la probeta para ensayo de impacto bajo norma ASTM E 23



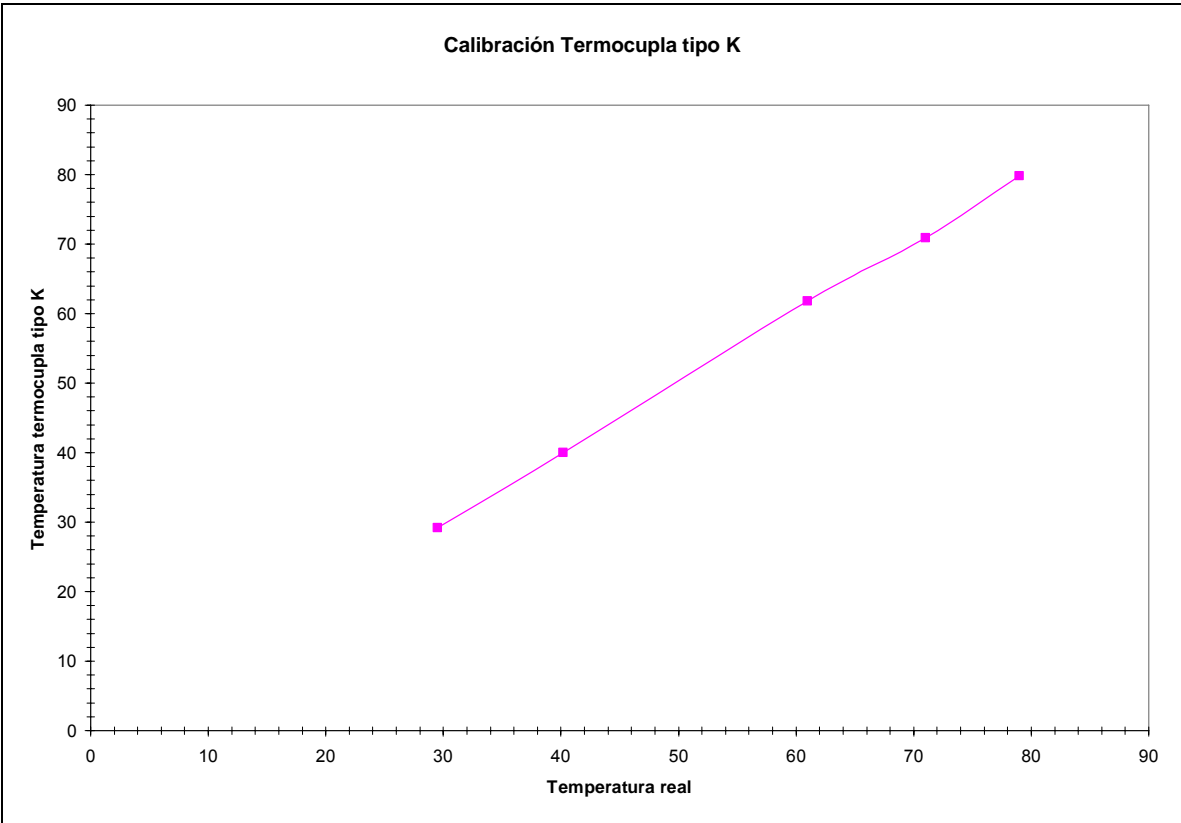
## ANEXO D

### CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

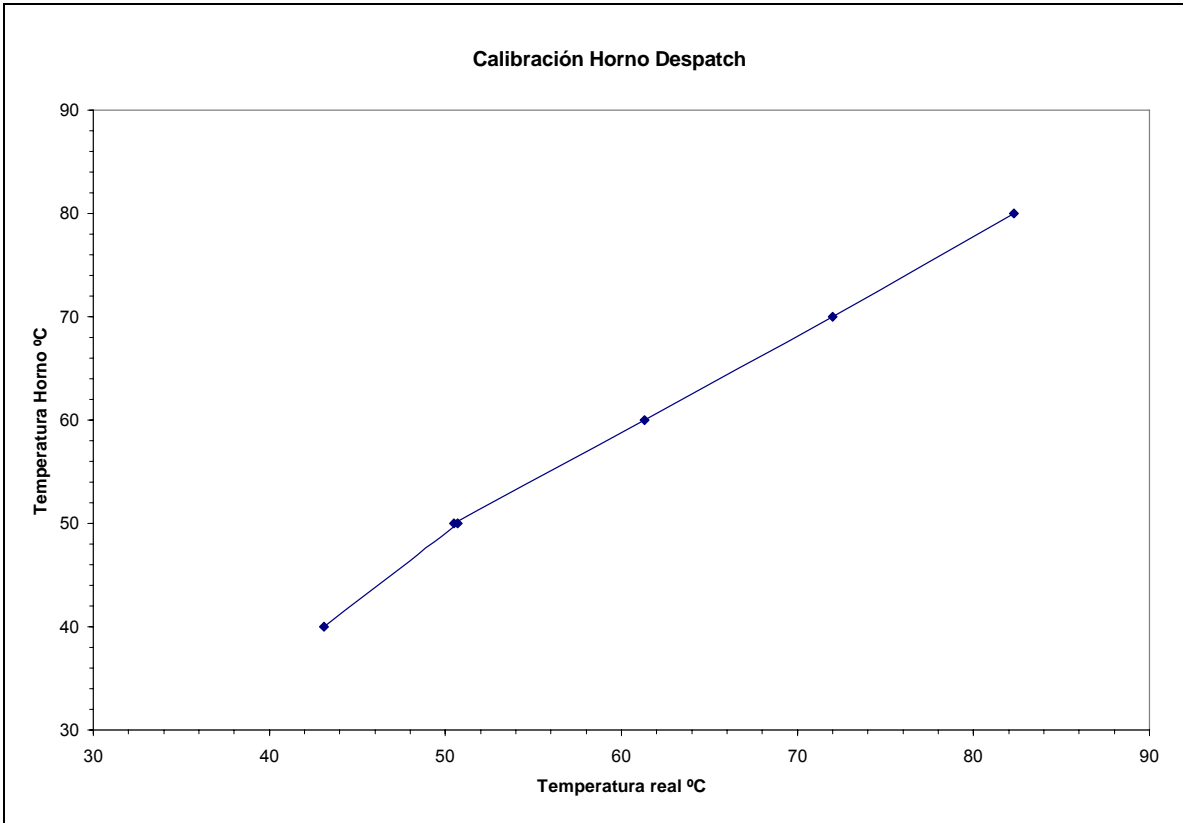
**Figura D 1.** Curva de calibración termocupla tipo J



**Figura D 2.** Curva de calibración termocupla tipo K



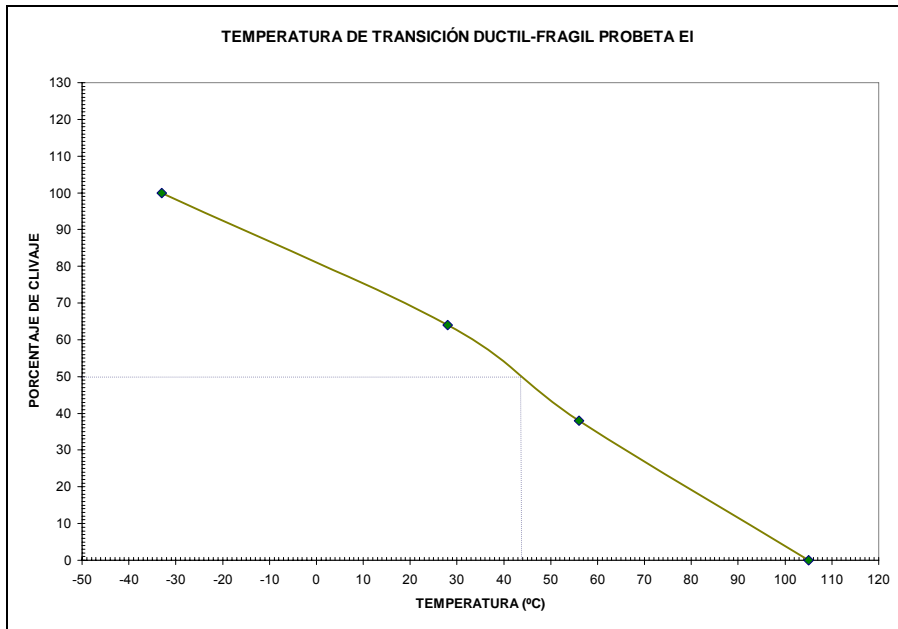
**Figura D 3.** Curva de calibración horno Despatch



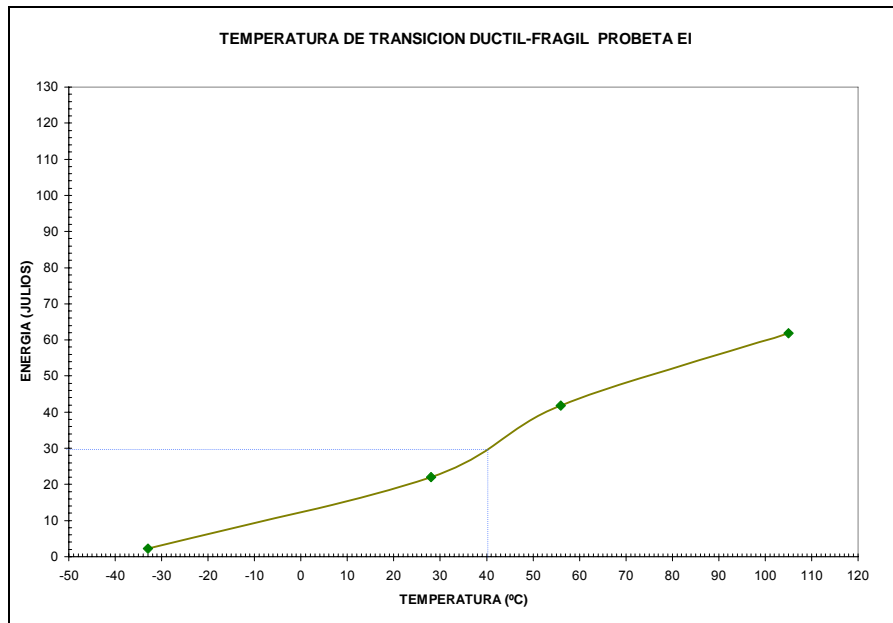
## ANEXO E

### GRÁFICAS TEMPERATURA DE TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

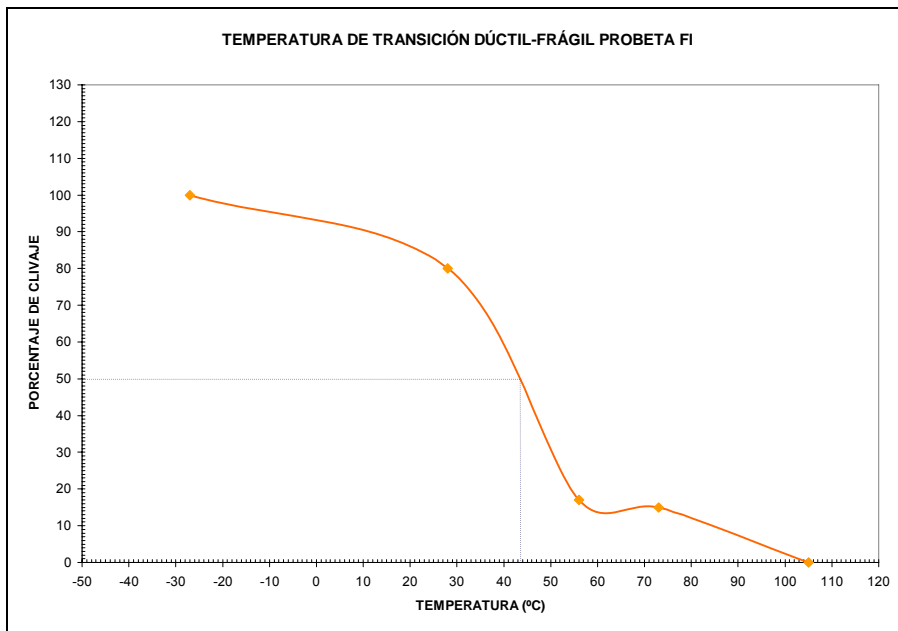
**Figura E 1.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta EI



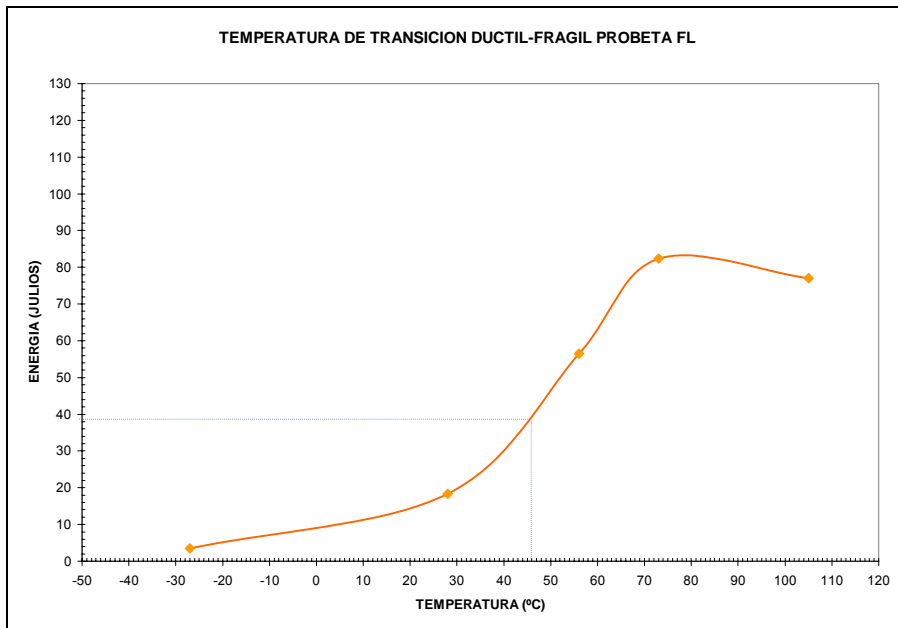
**Figura E 2.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta EI



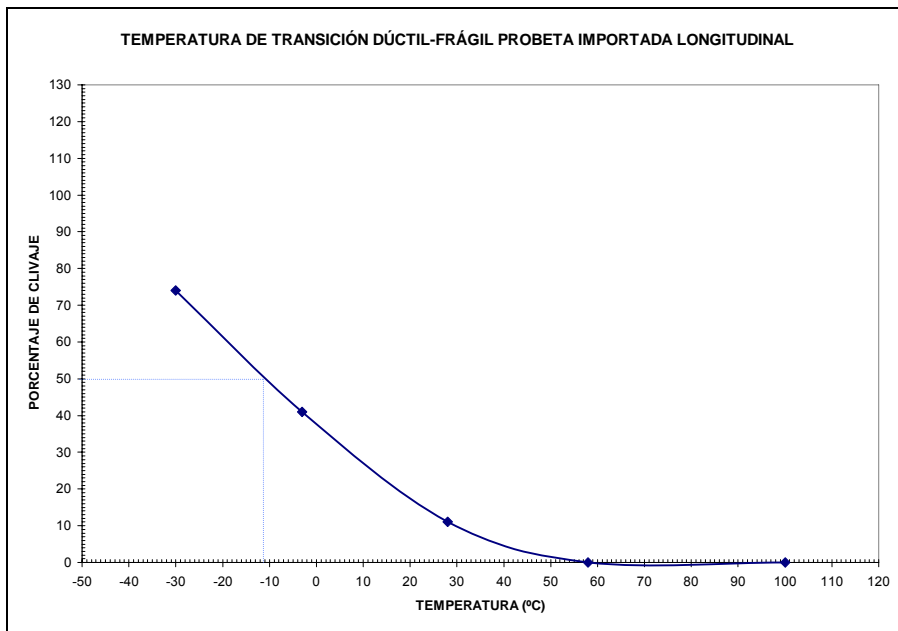
**Figura E 3.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta FI



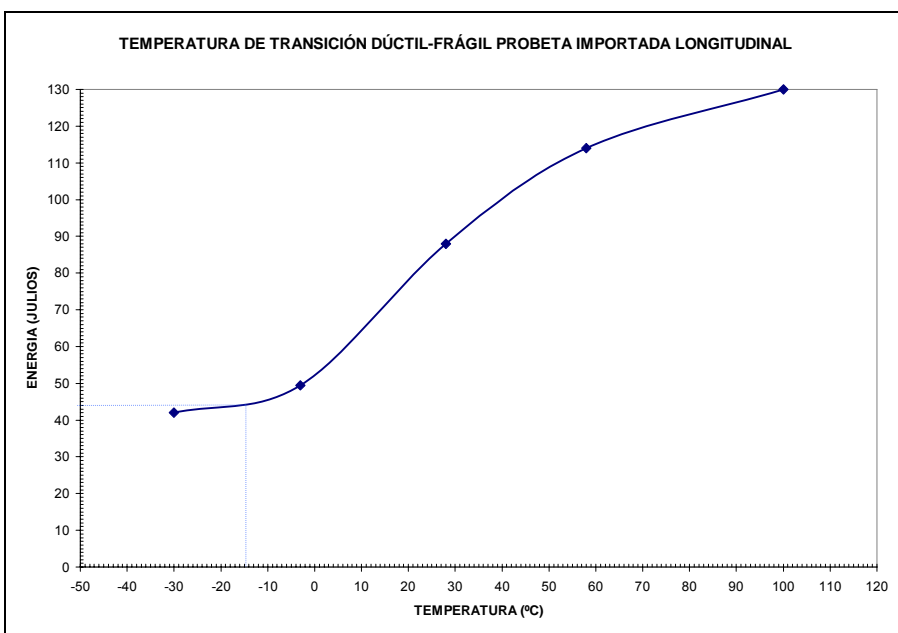
**Figura E 4.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta FI



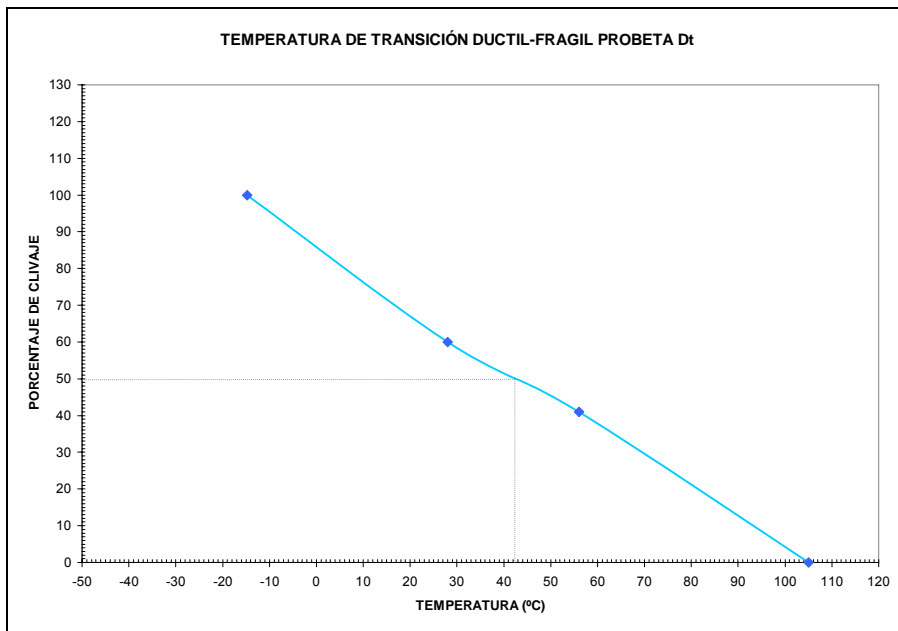
**Figura E 5.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta importada longitudinal



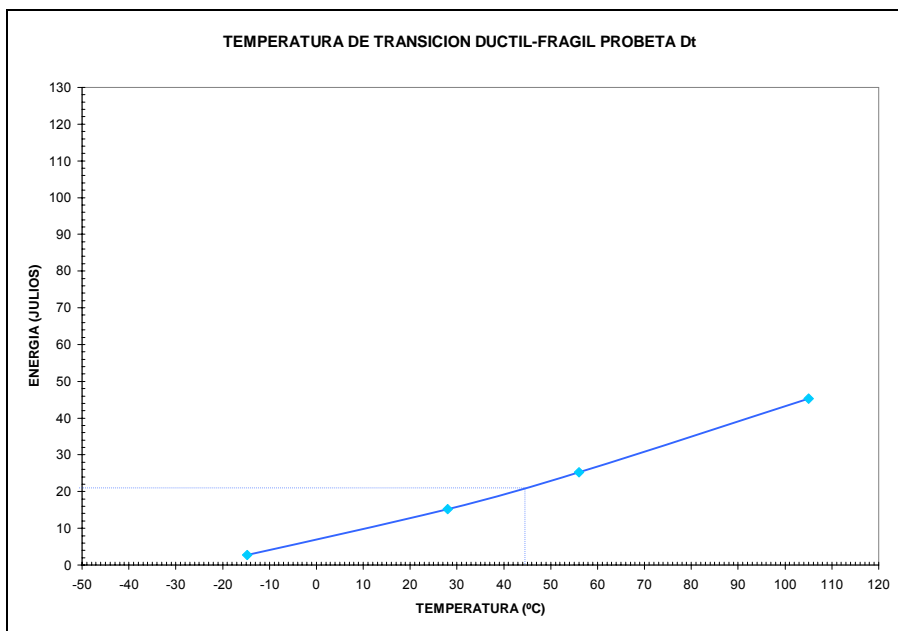
**Figura E 6.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta importada longitudinal



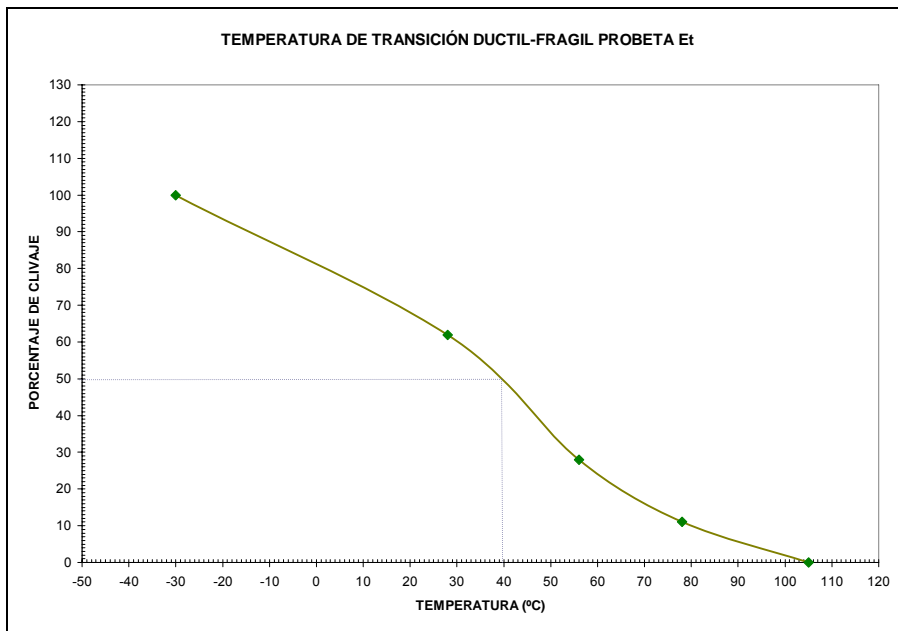
**Figura E 7.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta Dt



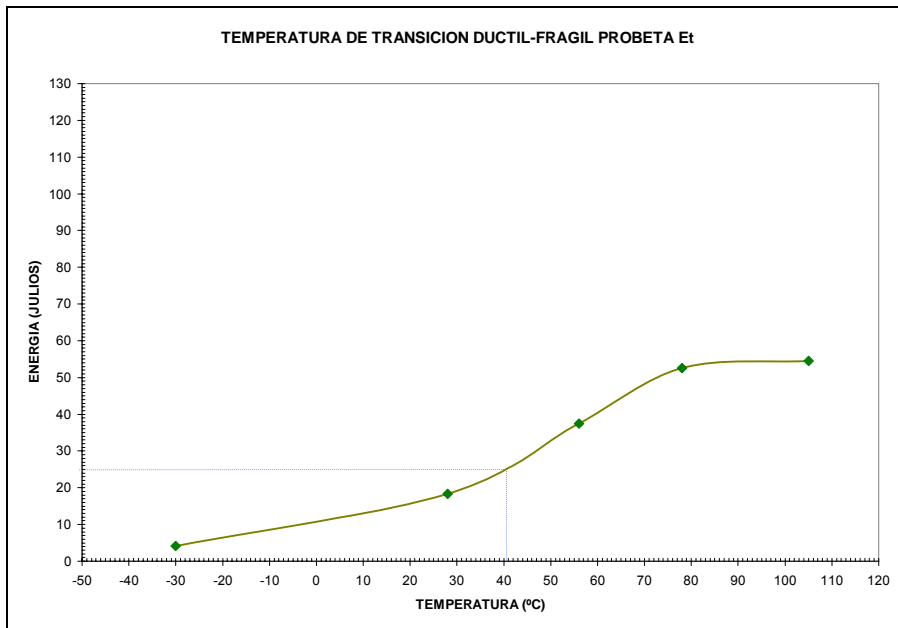
**Figura E 8.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta Dt



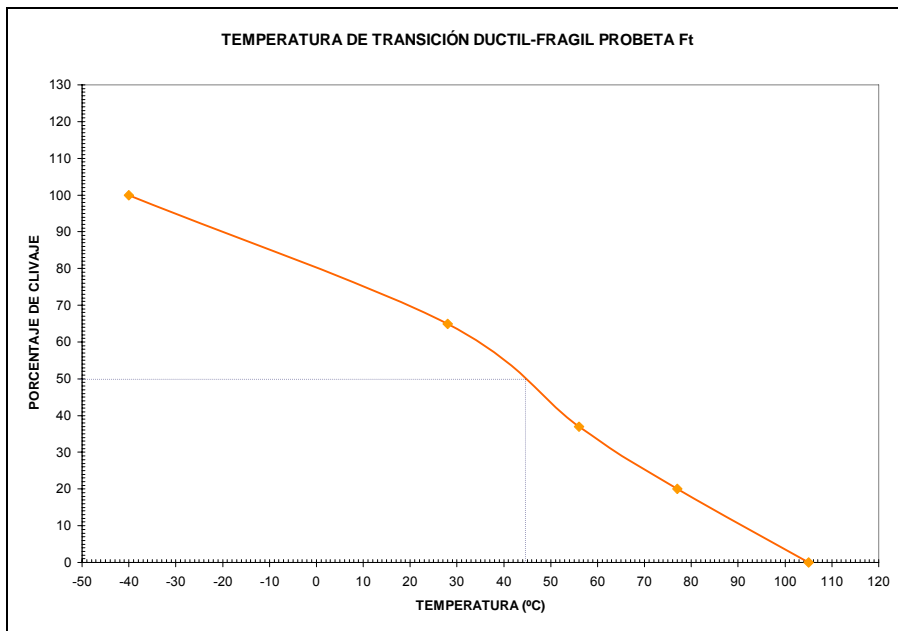
**Figura E 9.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta Et



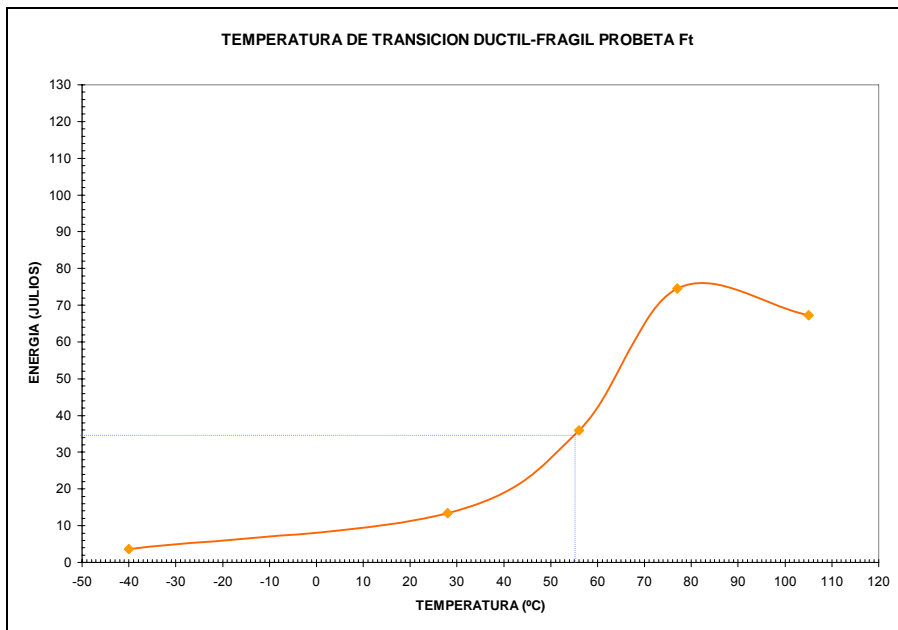
**Figura E 10.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta Et



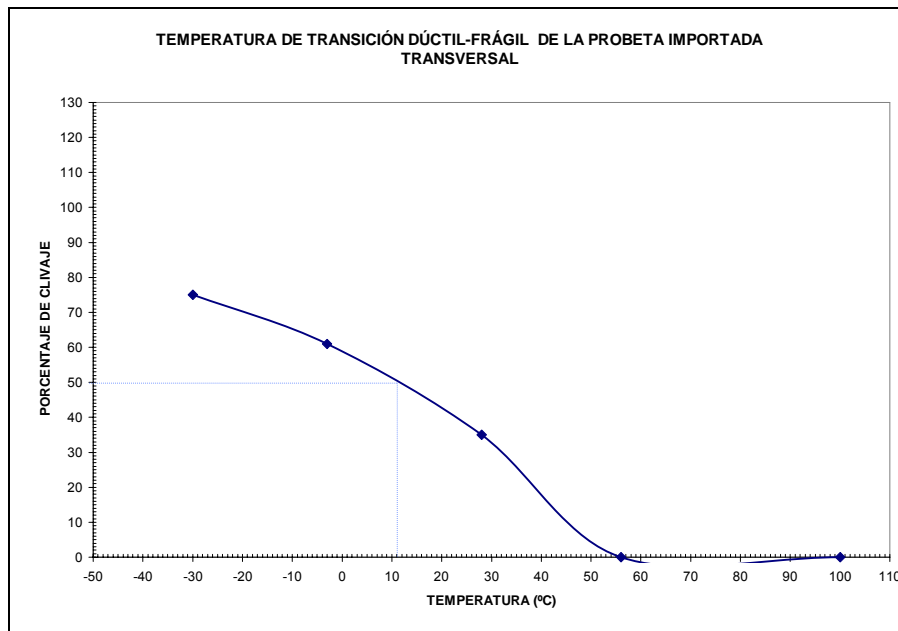
**Figura E 11.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje en la probeta Ft



**Figura E 12.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta Ft



**Figura E 13.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de clivaje probeta importada transversal.



**Figura E 14.** Gráfica temperatura de transición dúctil-frágil para un 50% de energía absorbida en la probeta importada transversal.

