



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 29 de mayo de 2025

Número de control: ICBI-D/862/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica **Emma Patricia Muñoz Flores**, quien presenta el trabajo de titulación "**Caracterización metalúrgica de un acero doble fase galvanizado para uso automotriz**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

- Presidente:** Dr. Miguel Pérez Labra
- Secretario:** Dr. Edgar Cardoso Legorreta
- Vocal:** Dr. Martín Reyes Pérez
- Suplente:** I.Q.M. Luis Rodrigo Palomera Rodríguez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carrotera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA
MINERO-METALÚRGICA**

TESIS

**“Caracterización metalúrgica de un acero doble
fase galvanizado para uso automotriz”**

Para obtener el título de

Licenciada en Ingeniería Minero-Metalúrgica

Presenta

Emma Patricia Muñoz Flores

Director

IQM. Luis Rodrigo Palomera Rodríguez.

Dr. Martín Reyes Pérez

Comité tutorial

Dr. Miguel Pérez Labra

Dr. Edgar Cardoso Legorrera

Pachuca de Soto, Hidalgo., junio, 2025

Índice.

Índice.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Agradecimientos	5
Lista de tablas.....	6
Lista de figuras.....	7
Capítulo I.....	1
I.1 Introducción.....	1
I.2 Justificación.....	4
I.3 Objetivo General.....	6
I.4 Objetivos Particulares.....	6
Capítulo II Marco teórico.....	7
II.1 Los aceros en la metalurgia.....	7
II.2 Aceros AHSS en la industria automotriz.....	9
II.3 Microestructura y propiedades mecánicas de los aceros DP.....	14
II.4 Pruebas destructivas y base matemática.....	20
II.5 Mecánica de fractura.....	27
II.6 Probetas para ensayo de tracción.....	29
II.7 Tipos de probetas.....	30
II.8 Teoría del comportamiento mecánico del acero.....	34
Capítulo III Experimentación.....	37
III.1 Preparación de muestra para ataque químico y análisis metalográfico.....	37
Capítulo IV Resultados y discusión.....	39
IV.1 Análisis metalográfico de los aceros evaluados.....	39
IV.2 Ensayo y resultados de la prueba de tracción.....	47
Conclusiones.....	59
Bibliografía.....	60

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la caracterización de un acero doble fase (dual phase DP) para uso automotriz, con la finalidad de estudiar, analizar y comprender sus usos y aplicaciones en la industria. Si bien, el desarrollo de los aceros para este uso ha ido en aumento en los últimos años es indispensable conocer las propiedades de cada uno de ellos para poder hacer una selección adecuada de acuerdo a las necesidades presentes.

Mediante la caracterización del acero DP1000 se pueden conocer distintos aspectos de su comportamiento mecánico y la estrecha relación existente con la microestructura. El análisis principal llevado a cabo en esta investigación son las propiedades mecánicas otorgadas por la microestructura, ya que, conociendo a fondo la distribución de fases y su proporción es probable obtener una aproximación de su posible comportamiento mecánico, esta idea es reforzada con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción, donde se demuestra lo observado por el microscopio.

El ensayo de tracción es representativo de un todo, proporciona un acercamiento del que pudiera ser su comportamiento aplicado a la realidad. El constante cambio en la industria y la necesidad nuevas aleaciones que satisfagan los problemas de seguridad en los vehículos, como lo es el caso del acero doble fase (Dual phase) DP que es utilizado en partes de seguridad para automóvil, ha llevado a la investigación y desarrollo de distintos grados de acero.

El acero DP y en concreto el acero DP1000 utilizado en esta investigación cubre parte de estas necesidades, ya que presenta una resistencia superior a muchos aceros similares y una menor ductilidad, lo que lo hace ideal para su uso en partes de seguridad para automóviles, debido a las grandes cargas que deben resistir y las formas complicadas que estas tienen. Para poder de alguna forma poner las diferencias entre el acero DP1000 y otros aceros similares se analizó de igual forma un acero HX220LAD, que a diferencia del acero DP este es un acero mucho más dúctil pero menos resistente.

Abstract

This research presents the characterization of a dual-phase (DP) steel for automotive use, with the goal of studying, analyzing, and understanding its uses and applications in the industry. Although the development of steels for this purpose has increased in recent years, it is essential to understand the properties of each steel in order to make an appropriate selection based on current needs.

By characterizing DP1000 steel, various aspects of its mechanical behavior and the close relationship with its microstructure can be understood. The main analysis carried out in this research focuses on the mechanical properties conferred by the microstructure. A thorough understanding of the phase distribution and their proportions provides an approximation of its potential mechanical behavior. This idea is reinforced by the results obtained in the tensile test, which demonstrates what was observed under the microscope.

The tensile test is representative of the entire product and provides an insight into its potential behavior when applied to real-life applications. Constant changes in the industry and the need for new alloys that address vehicle safety challenges, such as dual-phase (DP) steel used in automotive safety components, have led to the research and development of different steel grades.

DP steel, and specifically the DP1000 steel used in this research, meets some of these needs, as it has greater strength than many similar steels and lower ductility, making it ideal for use in automotive safety components due to the high loads they must withstand and their complex shapes. To somewhat differentiate DP1000 steel from other similar steels, an HX220LAD steel was also analyzed. Unlike DP steel, this steel is much more ductile but less resistant.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido el resultado del esfuerzo, perseverancia y el apoyo invaluable de quienes me acompañaron en este camino a los cuales les dedico este trabajo de investigación. Agradezco de la manera más profunda a mis queridos padres Javier y Patricia quienes me inspiraron desde pequeña para perseguir mis sueños y crecer como persona y que a pesar de que las cosas en ocasiones no siempre eran favorables siempre tuvieron palabras para motivarme a continuar, este logro también es suyo, los amo con todo mi corazón. Gracias por confiar en mí.

A mis hermanos, Jime, Javier, Adri y Eduardo que siempre me escucharon y estuvieron para escucharme y hacerme reír cada vez que lo necesitaba, por brindarme el apoyo que siempre necesite.

A mi tía Solecito y a mi primo Diego, gracias por brindarme tu amor y cariño, por abrir las puertas de su hogar y de su corazón, no tengo palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí.

A mis amigos y asesores por ser parte de este proyecto, mi más sincero agradecimiento.

Lista de tablas

Nombre	Pag.
Capítulo I	
I.1 Propiedades del acero DP, obtenidas del sitio de Tata Steel.	2
Capitulo II	
II.1 Detalle de la aplicación de distintos grados de aceros DP (National Material Company, 2018).	10
II.2 Especificaciones de las dimensiones de la probeta.	32
II.3 Tabla comparativa de ambos sistemas cristalinos.	36
Capitulo IV	
IV.1 Datos obtenidos en el programa ImageJ	42
IV.2 Resultados del análisis de la metalografía, 1 ferrita, 2 bainita y algunos rastros de perlita.	44
IV.3 Compilación de los datos obtenidos en cada una de las pruebas.	57

Lista de figuras

Nombre	Pag.
Capítulo II	
II.1. Diagrama "banana" Resistencia a la tracción (MPa) y Elongación en porcentaje.	7
II.2 Representación del uso de aceros DP en la estructura metálica del automóvil (DOCOL, 2024)	10
II.3 Representación gráfica del circuito en Borlänge, Suecia (Granbom, 2010)	12
II.4 Transformación de austenita a) diagrama de enfriamiento b) representación de las fases en la transformación de austenita	13
II.5. Esquema de las islas de martensita y la matriz de ferrita	14
II. 6 Representación de los elementos necesarios para que se de la corrosión.	16
II.7. Esquema de una celda galvánica	17
II.8. Esquema de una celda electrolítica	18
II.9 Sección de la serie electromotriz. Diferencia de potencial en dónde se observan los valores para la reacción del Fe y Zn.	20
II.10 Representación de los tipos de pruebas para corroborar la confiabilidad de un material.	21
II.11 Curva esfuerzo-deformación.	22
II.12. Tipos de fractura dúctil (a la izquierda) y frágil (derecha), tomado del sitio de (Gold Supplier.com, 2024).	29
II.13 Probeta cilíndrica obtenida del sitio de Zwick Roell	31
II.14 Probeta plana tomada del sitio de Zwick Roell	31
II.15 Probeta plana con las dimensiones especificadas en la tabla inferior	32
II.16 Representación de la estructura cristalina BCC tomada del sitio de Iowa State University	35

Nombre	Pag.
Capítulo II	
II.17 Representación de sistema cristalino FCC toma del sitio de Iowa State University	35
Capítulo IV	
IV.1 Análisis metalográfico de los aceros DP1000 y HX220LAD empleando Nital y picral.	39
IV.2 Microestructura de un acero DP1000, tomada 100X, atacada con picral.	40
IV.3 Ajustes y saturación para definición de las fases del acero DP1000	41
IV.4 Microestructura ajustada con la aplicación ImageJ para distinguir las fases presentes en la microestructura del acero DP1000	42
IV.5 Microestructura de un acero HX220LAD, donde se pueden observar ferrita (fase blanca), bainita (fase gris claro) y martensita (fase oscura).	43
IV.6 Microestructura de un acero HX220LAD, ferrita (fase blanca), bainita (fase gris claro) y martensita (fase oscura)	44
IV.7 Ajustes y saturación para definición de las fases del acero HX220LAD	45
IV.8. Aspectos básicos para fabricar una aleación	47
IV.9 Dimensiones de las probetas utilizadas basadas en la norma ASTM E8, imagen tomada del sitio de (Zwick Roell, s.f.).	48
IV.10 Distribución de las probetas y la dirección de corte.	48
IV.11 Probetas después de ser utilizadas en el ensayo de tracción.	49
IV.12 Curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo de tracción de la probeta con dirección A) 0°, B) 45 ° y C) 90°.	51
IV.13 ubicación del punto de fluencia (YP) en la curva esfuerzo - deformación	52
IV.14 Ejemplo de la ampliación gráfica de la ley de Hollomon	55

Capítulo I

I.1 Introducción.

En la actualidad la industria del acero es uno de los sectores productivos más importantes para el desarrollo por tal la investigación y análisis de nuevos materiales son imprescindibles para un continuo progreso y avance tecnológico. El amplio panorama que tenemos en el acero nos brinda suficiente material para poder conformar nuevas aleaciones dependiendo del alcance de las herramientas dispuestas para dicho desarrollo.

Uno de los campos más importantes de aplicación es el sector automotriz, dónde se emplean diversos tipos de aceros para distintos fines, los cuales proporcionan ciertas características de dureza, elasticidad y tenacidad. “El acero de alta resistencia de la serie (dual phase) DP es el acero preferido para piezas estructurales en la actualidad, y se usa ampliamente en piezas de refuerzo y piezas anticolidión.

Por ejemplo, travesaños inferiores de cabina, raíles, barras de protección, estructuras de refuerzo de barras de protección, etc.” (Cosa Steel, 2022) Parte de estas aleaciones como los aceros DP, CP, FB, TRIP, TWIP etc, de fase dual, fase compleja, ferrítico-bainítico, plasticidad inducida por transformación y plasticidad inducida por maclado respectivamente. de grado automotriz son conocidas como aceros avanzados de alta resistencia, por sus siglas en inglés AHSS “Advanced High Strenght Steel”.

De estos podemos mencionar los fase dual (en inglés “Dual Phase” DP), de los cuales se pueden rescatar las buenas propiedades mecánicas que posee, en comparación a muchos otros materiales tal como su resistencia mecánica y el menor costo de producción

Tabla I.1 Propiedades del acero DP, obtenidas del sitio de Tata Steel.

Propiedad	Grado	CR DP1000LY
Tipo de recubrimiento		GI
Límite elástico $R_{p0.2}$	N/mm ²	590-740
BH2 Min.	N/mm ²	30
Resistencia a la tracción	N/mm ²	980-1130
Elongación	%	10
Valor de r		-
Valor de n		-

Las propiedades que poseen los aceros doble fase se deben básicamente a sus componentes microestructurales que son principalmente martensita y ferrita, proporcionando resistencia a la tracción mayores a 1200 MPa y elongaciones muy por arriba del 27 %. Esta gran resistencia que presentan este tipo de aceros es debido a las partículas de martensita, ferrita y a los esfuerzos repartidos entre ambas fases.

El porcentaje de martensita presente en la aleación es determinante para la temperatura M_s (temperatura a la cual inicia la transformación de la martensita), cuando el porcentaje de martensita aumenta también lo hace la temperatura M_s . La diferencia de fases presentes en los aceros DP provocan una variación de volumen en el tratamiento térmico y la austenita γ se transforma en martensita, ocasionando que la ferrita adyacente a la martensita, cause deformaciones plásticas provocando un número considerable de dislocaciones.

Estas dislocaciones son móviles debido a que para la formación de la martensita es necesario realizar un enfriamiento a una velocidad alta, por lo tanto, existen pocas posibilidades de que se adhieran por los espacios intersticiales. El desarrollo de los aceros doble fase han sido de gran importancia debido a sus propiedades, puesto que se ha podido aplicar en la industria automotriz, algunos de los usos que se les da son los siguientes:

- Refuerzos para puertas y umbrales.
- Vigas para chasis

- Componentes de soporte
- Cajas de choque.

Los aceros DP para su empleo en el área automotriz son laminados en frío, esto, con el fin de aumentar su dureza por deformación en frío (acritud) provocando dislocaciones mejorando en gran medida la formabilidad de dichos aceros. Estas propiedades principalmente se deben a la martensita presente en los aceros DP, la cual brinda tenacidad, morfología (tamaño, forma) y la fracción de volumen, está determinada por la cantidad de carbono contenido en la martensita.

Un aumento de volumen en la martensita da una mayor tenacidad intrínseca al acero esto debido al bajo contenido de carbono, por el contrario, una reducción del volumen de martensita en un acero induce un efecto favorable en la continuidad de la martensita.

I.2 Justificación

En distintos sectores como la construcción o la automoción actualmente está invadida por los materiales avanzados de alta resistencia y baja aleación, esto debido a las necesidades de la industria, puesto que con el pasar de los años se requieren materiales mucho más resistentes y a su vez más ligeros, que proporcionan propiedades mecánicas específicas para su uso.

A través de la caracterización de estos materiales es posible obtener información importante sobre su comportamiento y características para poder hacer una buena selección de acuerdo al área que se desee emplear. Además, proporciona herramientas para su fabricación y reproducción para la aplicación designada con un proceso óptimo de producción.

La respuesta de la industria siderúrgica a nuevos desafíos se encuentra en un rápido desarrollo de aceros de mayor resistencia, llamados aceros avanzados de alta resistencia “Advanced High Strength Steels (AHSS). Estos aceros se caracterizan por una formabilidad mejorada y resistencia al choque en comparación con los aceros convencionales. La categoría de AHSS cubre los siguientes tipos genéricos: dual phase (DP), plasticidad inducida por transformación (TRIP), fase compleja (CP) y aceros martensíticos (MART).

Por lo tanto, la investigación propuesta busca mediante el desarrollo de análisis metalográficos, pruebas de tensión, dureza, análisis de la composición química semicuantitativa y la morfología con la finalidad de caracterizar metalúrgicamente un acero dual (DP1000) laminado en frío, para conocer sus propiedades mecánicas y darle un uso eficiente al acero.

La información obtenida durante la etapa experimental permitirá conocer las propiedades del acero, así como definir la ruta de producción de este material, lo cual es de importancia para definir sus aplicaciones en la industria automotriz.

Los ensayos realizados brindarán la suficiente información para definir los usos y aplicaciones que se le pueden dar a este material, los beneficios que brinda a la industria, las

necesidades que cubre y si es óptimo para el manejo que se requiera darle en el campo de aplicación.

Este trabajo tendrá un impacto directo en la industria de la automoción al generar datos que faciliten la aplicación y la toma de decisiones tanto en el diseño como en la aplicación del acero DP1000.

I.3 Objetivo General

Caracterizar metalúrgicamente un acero automotriz galvanizado doble fase, mediante pruebas metalográficas, mecánicas y microscópicas para conocer las propiedades mecánicas obtenidas durante la ruta productiva y así definir sus posibles usos en la industria.

I.4 Objetivos Particulares

- Determinar la microestructura del acero mediante pruebas metalográficas para encontrar las fases presentes en el acero DP.
- Caracterizar metalúrgicamente el acero DP mediante pruebas de tensión y mediciones de dureza de la muestra de acero tanto del sustrato como del recubrimiento de la muestra para conocer su resistencia.
- Analizar los resultados mediante la aplicación de relaciones metalúrgicas para dar una resolución de los usos y aplicaciones de la aleación.
- Diferenciar, comparar y seleccionar aleaciones mediante su aplicación requerida para dirigir su uso industrialmente.
- Relacionar la microestructura y las propiedades mecánicas del acero mediante el análisis detallado de sus propiedades para conocer su comportamiento físico de aplicación industrial.

Capítulo II Marco teórico

II.1 Los aceros en la metalurgia

A mediados del siglo pasado, el desarrollo y la continua innovación en la industria automotriz exigía a los fabricantes nuevos materiales capaces de cumplir con ciertos estándares de calidad cumpliendo con características específicas que proporcionen seguridad para los usuarios.

Tras la búsqueda de aceros que pudieran cumplir con la resistencia y formabilidad requeridas para su aplicación, nacieron los aceros conocidos como: aceros avanzados de alta resistencia” (Advanced High Strength Steels AHSS). Este tipo de aceros tienen la combinación adecuada de resistencia, tenacidad y formabilidad, los cuales han tomado gran importancia para la fabricación de automóviles, incluso, desde su desarrollo han incrementado la aparición de nuevos aceros AHSS. Debido a esto actualmente se cuentan con tres generaciones de aceros AHSS los cuales se ven representados en un gráfico conocido como “diagrama banana”.

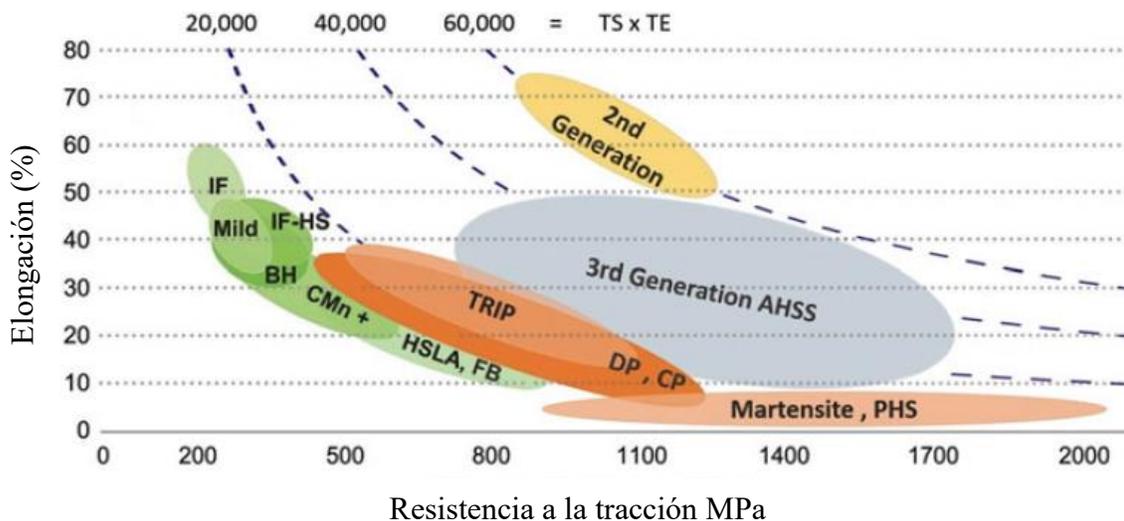


Figura II.1. Diagrama "banana" Resistencia a la tracción (MPa) y Elongación en porcentaje.

La importancia de los aceros AHSS de tercera generación radica en la combinación de resistencia y formabilidad, lo cual los hace ideales para su uso como piezas de seguridad en la industria automotriz. Una de las principales categorías de los aceros AHSS son los aceros doble fase (Dual Phase DP) el cual fue empezado su uso gracias a las constantes demandas competitivas y los nuevos retos presentes a finales del siglo XX.

Para mediados de la década de los noventa este tipo de aceros comenzaron a ser comercializados. “Los desafíos existentes provenientes de los fabricantes de automóviles y de los materiales competitivos dieron origen a pruebas intensivas e implementación de aceros DP. En 1995, los aceros DP eran comercializados no sólo en Japón sino también en EE.UU. y Europa” (Fonstein, 2015)

Los aceros DP están formados por una matriz de ferrita con islas de martensita, la matriz de ferrita que es la que proporciona la formabilidad al acero, las islas de martensita son la fase dura del acero. De las características más destacables que podemos enumerar de los aceros DP es que poseen una alta resistencia a la fatiga, con una oportuna combinación de una alta resistencia a la tracción y alta deformación, debido a esto su uso en partes de seguridad para automóviles era mucho más viable que otros materiales.

La constante aplicación de los aceros DP y la demanda para su uso en estampado llevó a los fabricantes a crear nuevos grados de acero DP, además de evitar la corrosión utilizando líneas de galvanizado en caliente. Los aceros DP, presentan una alta resistencia a la tracción, debido a las partículas de martensita presentes en su microestructura además que dicha propiedad es particularmente presente por la presión y tensión existentes entre la martensita y la ferrita.

La constante aplicación de los aceros DP y la demanda para su uso en estampado llevó a los fabricantes a crear nuevos grados de acero DP, además de evitar la corrosión utilizando líneas de galvanizado en caliente.

II.2 Aceros AHSS en la industria automotriz.

Los aceros AHSS han ido evolucionando con el paso de los años, desde los de primera hasta tercera generación. En la primera generación están los aceros DP, TRIP, MS, CP y PHS, en la segunda generación están los TWIP y en la tercera generación los aceros multifase. Gracias a sus propiedades mecánicas de resistencia y formabilidad es que se ocupan para la fabricación de autopartes.

Los aceros DP pertenecientes a la primera generación de AHSS permiten disminuir el peso del automóvil además de ofrecer una muy alta resistencia y un índice bajo de elasticidad, esto según el sitio oficial de POSCO Products “Con un bajo índice de elasticidad de 0,5 a 0,6, el acero DP es fácil de trabajar y tiene el segundo alargamiento más alto después del acero TRIP.” (POSCO, 2022) Esto demuestra la utilidad de dicho acero en la fabricación de autopartes.

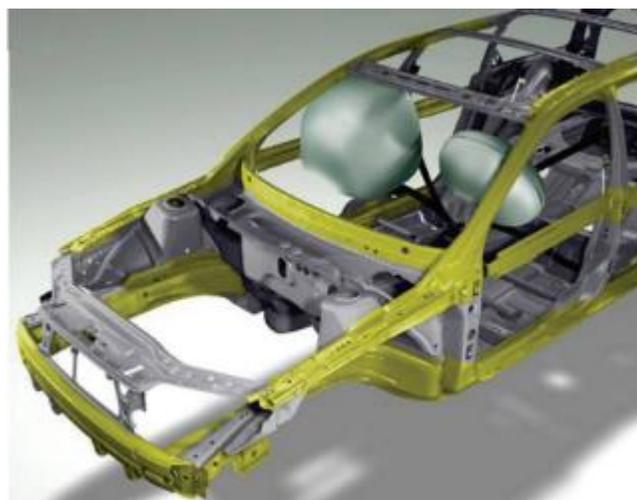
Ciertamente los aceros DP han ido evolucionando de acuerdo a las necesidades de los compradores, ya que, no siempre se utiliza el mismo grado de acero y dependiendo del fabricante son el tipo de aceros que se ofertan. Existen desde el grado 490 hasta el 1000 e incluso más. La designación de los grados del acero es de acuerdo a la resistencia a la tracción que presenta el acero en Megapascales (MPa), es decir, un acero DP960 cuenta con 1000 MPa de resistencia a la tracción.

La utilidad de los aceros DP en la industria automotriz definitivamente han marcado una pauta importante para la creación de nuevos grados de acero. La necesidad de crear mejores características en los aceros empleados para automóviles impulsó de manera positiva el desarrollo de distintos grados de acero DP, los cuales tienen distintas funciones dentro del automóvil. La Compañía Nacional de Materiales (National Material Company) ha proporcionado información acerca de los usos que se les dan a los distintos grados de aceros DP, la cual se presenta en la tabla I.2

Tabla II.1 Detalle de la aplicación de distintos grados de aceros DP (National Material Company, 2018).

Grado	Ampliación
DP300/500	Exterior de techo, Exterior de puerta, Exterior lateral de carrocería, Panel de piso.
DP350/600	Panel de piso, exterior del capó, exterior del lado de la carrocería, capó, guardabarros, refuerzos del piso.
DP500/800	Interior lateral de la carrocería, cuarto de panel interior, rieles traseros, refuerzos de amortiguador.
DP600/980	Pilar B, panel de piso, soporte del motor, rieles del asiento
DP700/1000	Rieles de techo.

La tabla anterior expresa de manera sencilla y práctica los usos más comunes y frecuentes que se le dan a distintos grados de aceros DP, por lo tanto, su aplicación es de suma importancia para asegurar la integridad del vehículo en caso de accidentes y sobre todo ofrecer mayor seguridad al usuario. Debido a sus propiedades mecánicas se utilizan en la fabricación de piezas complejas y de seguridad, es decir, son resistentes al impacto y por lo tanto se emplean en partes estratégicas del automóvil para aminorar los daños al momento de un impacto.



*Figura II.2 Representación del uso de aceros DP en la estructura metálica del automóvil
(DOCOL, 2024)*

Dependiendo del grado de acero y del fabricante es cómo se llevará a cabo la línea de producción del mismo. Para generar el tamaño de grano adecuado y las fases deseadas es necesario conocer y aplicar adecuadamente los tratamientos térmicos durante la producción, ya que de eso dependen las propiedades mecánicas que se obtienen al finalizar el proceso y si estas no cumplen con la calidad y requerimientos adecuados los costos se elevan exponencialmente para iniciar nuevamente con la producción.

Una de las formas más comunes de fabricar aceros DP es el laminado en frío de baja aleación (Cold Rolling of low alloy LA), aunque también pueden ser producidos por laminado en caliente. El proceso se elige de acuerdo a las necesidades y resultados que se deseen obtener en las propiedades del acero.

De acuerdo a “Total Materia” Tanto los aceros DP laminados en caliente como en frío ofrecen una combinación increíblemente ventajosa de bajo límite elástico, alta resistencia a la tracción, fácil trabajo en frío y soldabilidad debido a su microestructura reticular imbuida de ferrita-martensita. (Total Materia, 2020) En la figura II.3 se ilustra el proceso de fabricación de acero DP en una planta en Suecia.

Los tratamientos térmicos utilizados dependen muchísimos del fabricante y del grado de acero que se desee producir, puesto que la microestructura del acero es la que proporciona las propiedades mecánicas del mismo. Para la obtención de los aceros DP son muy importantes las temperaturas a manejar, tiempos de calentamiento etc. Aunque cada fabricante realiza distintos métodos de producción hay ciertas constantes entre los mismos.

“Los aceros DP se obtienen mediante tratamientos térmicos a temperaturas inter críticas. En el caso de los aceros hipoeutectoides se realiza el proceso calentamiento hasta una temperatura en el rango entre A_{c1} y A_{c3} , seguido de un proceso de enfriamiento controlado para transformar la austenita en martensita” (Rodolfo Rodríguez Baracaldo, 2016)

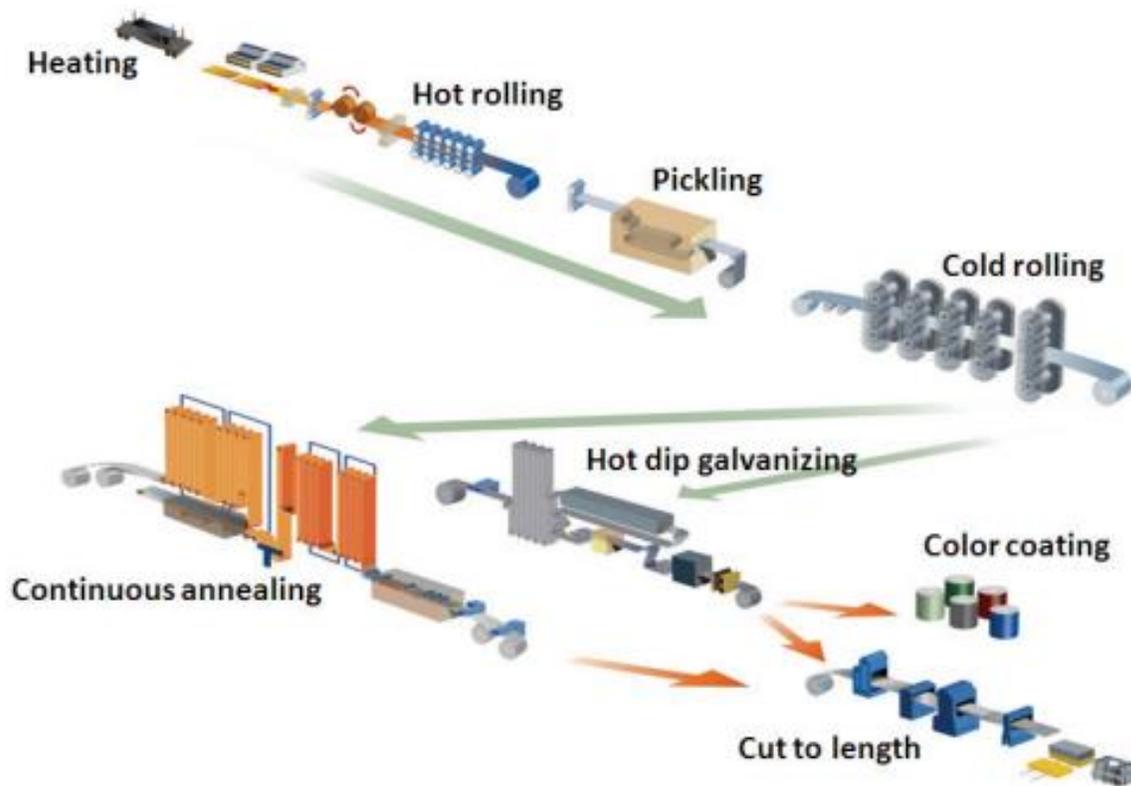


Figura II.3 Representación gráfica del circuito en Borlänge, Suecia (Granbom, 2010)

Por lo tanto, el proceso debe estar revisado y estandarizado para procurar un crecimiento de grano adecuado y la formación de fases idónea, lo cual consiste en revisar constantemente los parámetros de control establecidos para obtener los resultados requeridos por la norma y por el cliente.

La figura II.4 representa de una manera sencilla la formación de microestructuras a partir de la austenita. Para obtener distintos tipos de microestructura depende de la velocidad de enfriamiento, para esto se calienta el acero a una temperatura de transformación conocida como temperatura A_{c3} , para posteriormente mantener la temperatura durante un determinado tiempo para propiciar la difusión del carbono para posteriormente ser llevado a un proceso

de enfriamiento controlado para promover el crecimiento de grano y la formación de fase requerida.

Es necesario adquirir una velocidad de enfriamiento adecuada para ello se requiere de un medio de enfriamiento, el cual influye tanto en la recrystalización como en el tiempo que tardará en enfriarse el acero por completo, existen muchos medios de enfriamiento y de acuerdo a las fases que se quieran obtener es el medio que se va a utilizar, entre los principales medios de enfriamiento se encuentran: el agua, aceites, gas y sales fundidas.

Cabe resaltar la gran importancia de los tratamientos térmicos en los aceros, puesto que de ellos dependen las fases resultantes, por lo tanto, interfieren directamente con las propiedades mecánicas finales. Además del tipo de tratamiento térmico los elementos aleantes son muy útiles a la hora de la formación de fases.

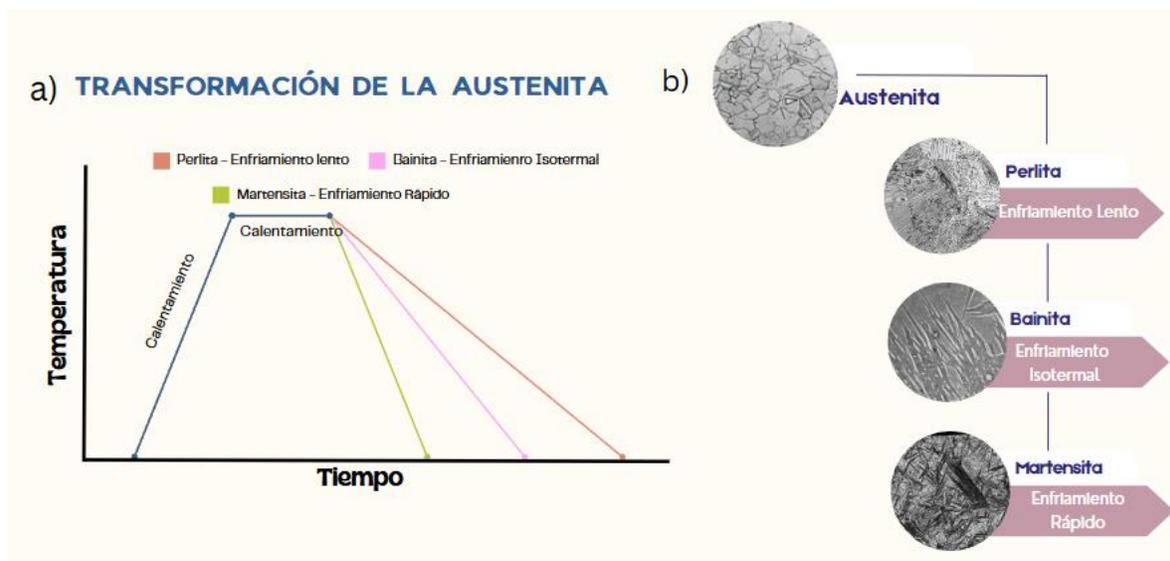


Figura II.4 Transformación de austenita a) diagrama de enfriamiento b) representación de las fases en la transformación de austenita.

II.3 Microestructura y propiedades mecánicas de los aceros DP.

Por lo antes mencionado en este documento se puede asumir que al observar una microestructura se puedan predecir las propiedades mecánicas del mismo, puesto que, conociendo las características de cada fase se puede inferir el comportamiento del acero. En los aceros DP tenemos una fase dual como lo dice su nombre, en el cual están presentes una fase dura de islas de martensita y una suave y dúctil matriz de ferrita.

Para generar microestructuras DP, se requiere un proceso de recocido continuo que incluye el recalentamiento de una microestructura de ferrita/perlita laminada en frío para después implementar un recocido intercrítico para formar una mezcla de austenita/ferrita, que después del enfriamiento final da como resultado una microestructura DP (Chengwu Zheng, 2013) Por lo tanto es preciso conocer el proceso de producción a fondo para tener controlados los parámetro y obtener las microestructuras adecuadas.



Figura II.5. Esquema de las islas de martensita y la matriz de ferrita

Los aceros DP contienen como segunda fase islas de martensita dura en una matriz ferrítica. La resistencia del acero mejora cuando aumenta la fracción de volumen de las segundas fases duras. La formación de aceros DP implica la transformación de parte de austenita en ferrita mediante enfriamiento controlado, seguido de un enfriamiento rápido para transformar el resto de la estructura de austenita en estructura de martensita” (World Auto Steel, 2014).

Por lo tanto, aumentando el porcentaje de islas de martensita obtendremos un acero con mayor resistencia puesto que la martensita por sí sola es una fase altamente resistente, mientras que la ferrita es la fase más suave de un acero DP. Para propiciar el crecimiento o formación de dichas fases se emplean diversos elementos aleantes que además añaden mejoras en las propiedades mecánicas de los aceros.

Como lo menciona (World Auto Steel, 2014) “La templabilidad también se puede aumentar agregando níquel, vanadio, molibdeno, cromo y manganeso individualmente o en combinación. Al igual que el fósforo y el silicio, la estructura de la martensita se refuerza como la ferrita mediante carbono.

Gracias a esto son excelentes al momento de fabricar estructuras y componentes complejos, ya que poseen una gran resistencia al agrietamiento y buena aptitud para el estampado y comparado con otros tipos de aceros de su mismo grupo este resulta ser uno de los más adecuados para su aplicación en la industria automotriz.

La fase blanda de los aceros DP (ferrita) suele ser una fase continua y por lo tanto ofrece una excelente ductilidad del acero. Además de que una de las características más destacables de los aceros DP es su capacidad de endurecimiento por calentamiento (Bake Hardening) lo convierten en una mejor opción que en otro tipo de aceros convencionales.

II.3 Recubrimiento y corrosión.

Uno de los principales problemas y más comunes en la industria del acero es la corrosión, esta es la oxidación que se da en la superficie de la pieza, lo que provoca un deterioro y/o destrucción de la misma, por lo tanto, ya no cumple correctamente con su funcionalidad. En palabras de (Mandhyan, 2014) La corrosión es el deterioro de los materiales por interacción química con su ambiente. El término corrosión a veces también se aplica a la degradación de los plásticos, hormigón y madera, pero generalmente se refiere a metales. El metal más utilizado es el hierro. (generalmente como acero) y la siguiente discusión está relacionada principalmente con su corrosión.

El metal al reaccionar en un medio como los ya antes mencionados genera una capa de óxido en la parte exterior, pero dicha capa no es protectora, al contrario, esta capa suele ir aumentando al punto de degradar por completo el material. Para que un proceso de corrosión se lleve a cabo necesitamos de tres factores super importantes que se ilustran a continuación.

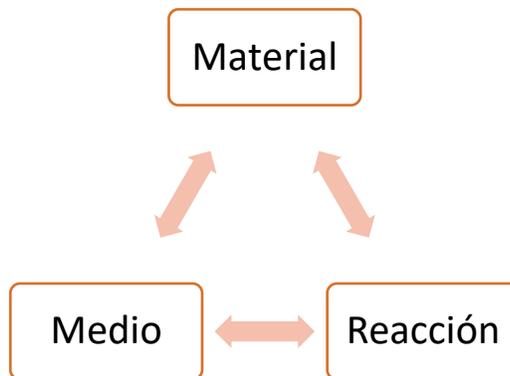


Figura II. 6 Representación de los elementos necesarios para que se de la corrosión.

Por lo tanto, para evitar la corrosión es necesario evitar que los tres elementos se combinen, de esto, se comenzaron a implementar distintos tipos de recubrimientos, con la finalidad de que la superficie de la pieza no esté expuesta a medios externos. Para realizar un recubrimiento en una lámina de acero como es el caso de un acero DP es necesario el uso de una celda electroquímica, la cual, cuenta con tres elementos indispensables: cátodo, ánodo y electrolito

En una celda electroquímica ocurren reacciones químicas heterogéneas por el intercambio de cargas entre el cátodo y el ánodo, eso quiere decir que son reacciones químicas de semicelda. $A + e^- = C$ reacción de reducción, requiere electrones para llevarse a cabo. $B = D + e^-$ reacción de oxidación, produce electrones.

Existen dos tipos de celdas electroquímicas, celdas galvánicas: son aquellas que no necesitan una batería externa para producir la reacción, por lo tanto, el proceso es espontáneo. Mientras que la celda electrolítica es aquellas que necesitan una batería o fuente externa para que la reacción se lleve a cabo y el proceso no es espontáneo.

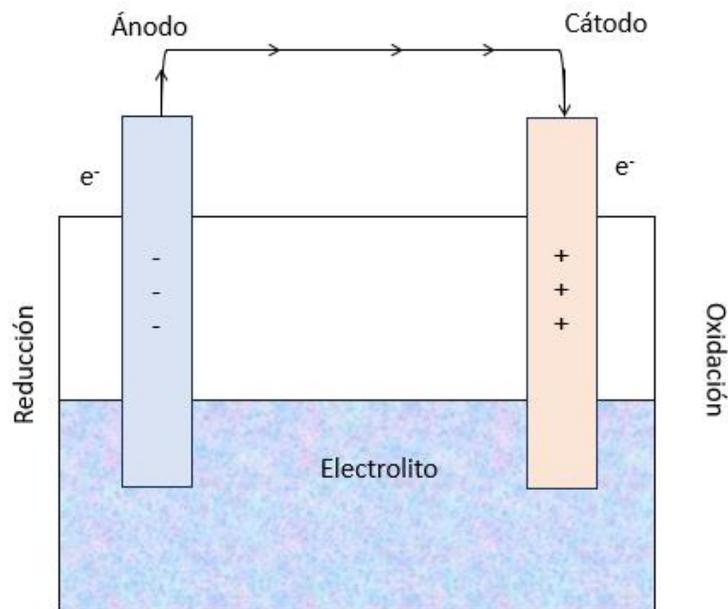


Figura II.7. Esquema de una celda galvánica

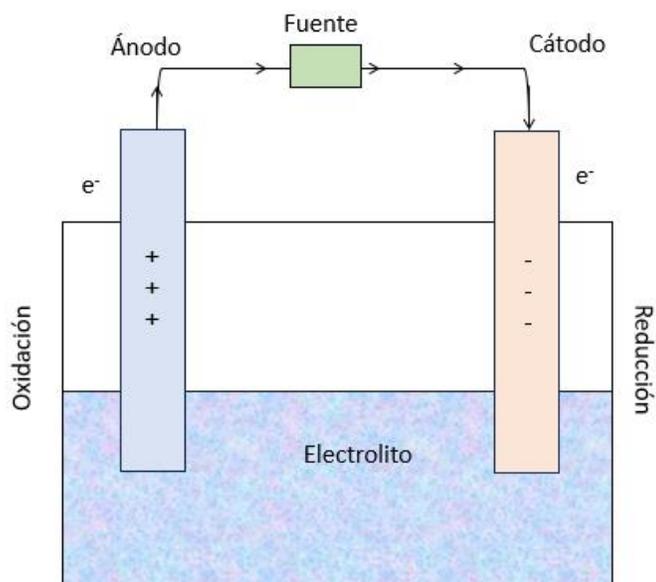


Figura II.8. Esquema de una celda electrolítica.

Para el proceso de recubrimiento de acero DP usualmente se emplea el Zn como ánodo (electrodo negativo) y la lámina de acero como cátodo (electrodo positivo). El Zn suele ser empleado en este tipo de procesos por su versatilidad, la sencillez de su aplicación, además de que el coste de aplicación es muy bajo. Pero una de las mayores motivaciones para el uso de este metal es su nobleza y su posición en la serie electromotriz.

La serie electromotriz también conocida como FEM no es más que la acción eléctrica de una fuente no eléctrica que es capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos. Básicamente la serie electromotriz muestra la diferencia de potencial (voltaje) de reacciones de media celda, el valor de la diferencia de potencial de una reacción determina la espontaneidad del mismo, es decir, entre más negativo es el valor de la diferencia de potencial de una reacción, más fácil es que se oxide.

En la mayoría de procesos de recubrimientos para aceros DP se utiliza el Zn, conocido como galvanizado, para el proceso, porque, además de la nobleza del metal este se oxida mucho más rápido que el acero DP.

Como se puede observar en la figura II.9 se encuentran los valores de la diferencia de potencial en algunas reacciones de media celda, en donde se observan los valores para reacciones de Zn y Fe, en donde se puede concluir la cinética de la reacción, es decir, que el Zn se oxida mucho más rápido que el Fe, por lo tanto, si ambos elementos se utilizan como electrodos en una celda electroquímica el Zn terminaría por recubrir al electrodo de Fe.

Para incrementar la protección contra la corrosión o del elemento decorativo de las láminas de acero galvanizado, pueden aplicarse recubrimientos orgánicos en forma de capa o pintura sobre el recubrimiento de zinc. Como resultado, los productos recubiertos de zinc pueden usarse en un gran número de sectores como el del automóvil, los productos del hogar, los electrodomésticos o la industria de la construcción” (Struers, 2024) .

Es muy común que para recubrimientos con Zn se haga uso de otro metal para su aplicación, como el níquel y el aluminio. Regularmente para aceros DP se utiliza el Zn-Al para alargar la vida útil de la lámina. El uso del Al en este tipo de recubrimientos entre otras cosas es que es excelente para evitar la corrosión debido a que forma un óxido (Al_2O_3) que es un buen medio protector además de ser un buen conductor térmico.

Por lo tanto, es indispensable la labor de los recubrimientos en la industria en general, puesto que un material en este caso metálico puede sufrir de corrosión catódica, es decir, la exposición a medios como el agua, gas, humedad etc.

Reacción de media celda	V
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,05
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{K}$	-2,93
$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,66
$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,76
$\text{Cr}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,74
$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,44
$\text{Ni}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,25
$\text{Sn}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,13
$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0

Figura II.9 Sección de la serie electromotriz. Diferencia de potencial en dónde se observan los valores para la reacción del Fe y Zn.

II.4 Pruebas destructivas y base matemática.

Para determinar la confiabilidad de un material en general, es necesario realizar distintas pruebas que garanticen que el material tenga las propiedades mecánicas descritas en la norma, existen diversos procesos para cuantificar. Los materiales los cuales se someten a distintas pruebas que nos arrojan distintos datos de importancia, dependiendo del uso que se le vaya a dar al material. Existen dos tipos de pruebas para materiales, se ilustran a continuación en la figura II.10.

Las pruebas destructivas son aquellas en las cuales se analiza un material sin destruirlo, es decir, se utilizan diversas técnicas como el ultrasonido, la inspección visual, partículas magnéticas o líquidos penetrantes que nos permiten observar fracturas o fallas en la pieza de manera externa o interna según sea el caso.

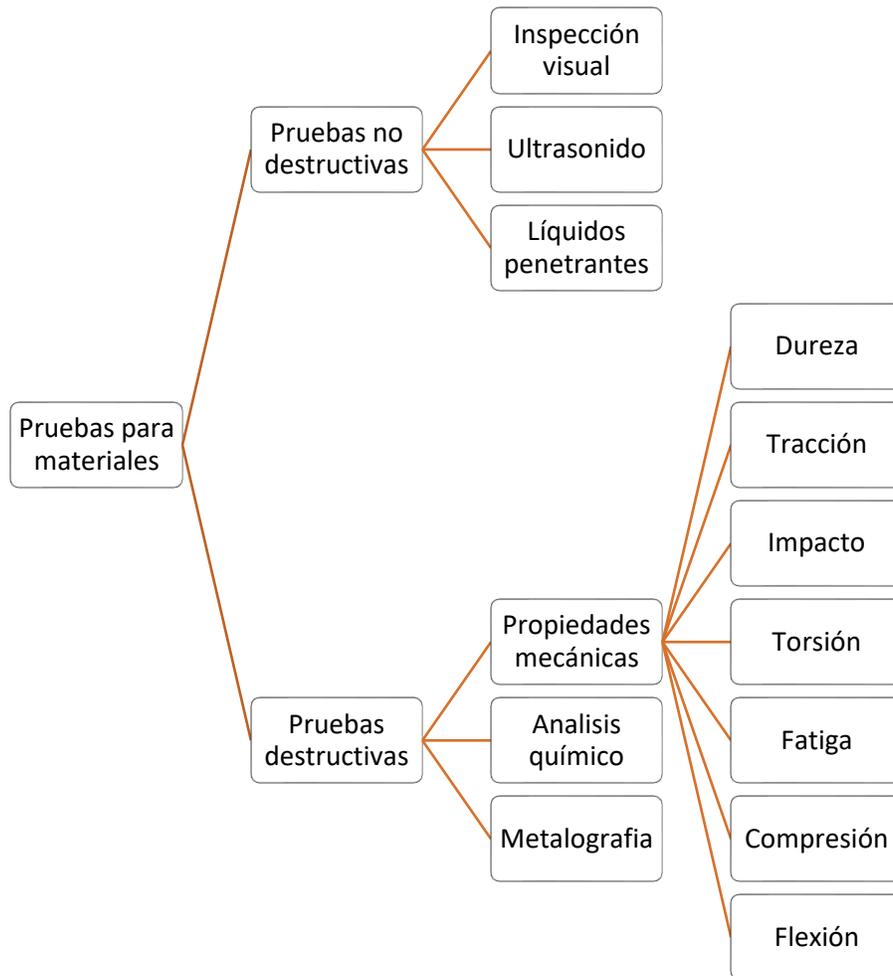


Figura II.10 Representación de los tipos de pruebas para corroborar la confiabilidad de un material.

En cambio, las pruebas destructivas son aquellas en las que se daña o destruye el material que se está analizando con la finalidad de obtener datos cuantificables. Uno de estos ensayos es el conocido como ensayo de tracción el cual muestra la relación esfuerzo-deformación e información sobre el esfuerzo a la cedencia, esfuerzo máximo y el esfuerzo de fractura. Este tipo de ensayos nos ayuda a conocer la capacidad que tiene un material de soportar cargas sin deformarse, sin fracturarse y sin fallar, de esta forma podemos hacer una buena selección de material para el uso que se le desee dar.

Como resultado del ensayo de tracción obtenemos la curva esfuerzo-deformación, en la cual se pueden observar distintos datos de importancia como se muestra a continuación en la figura II.10.

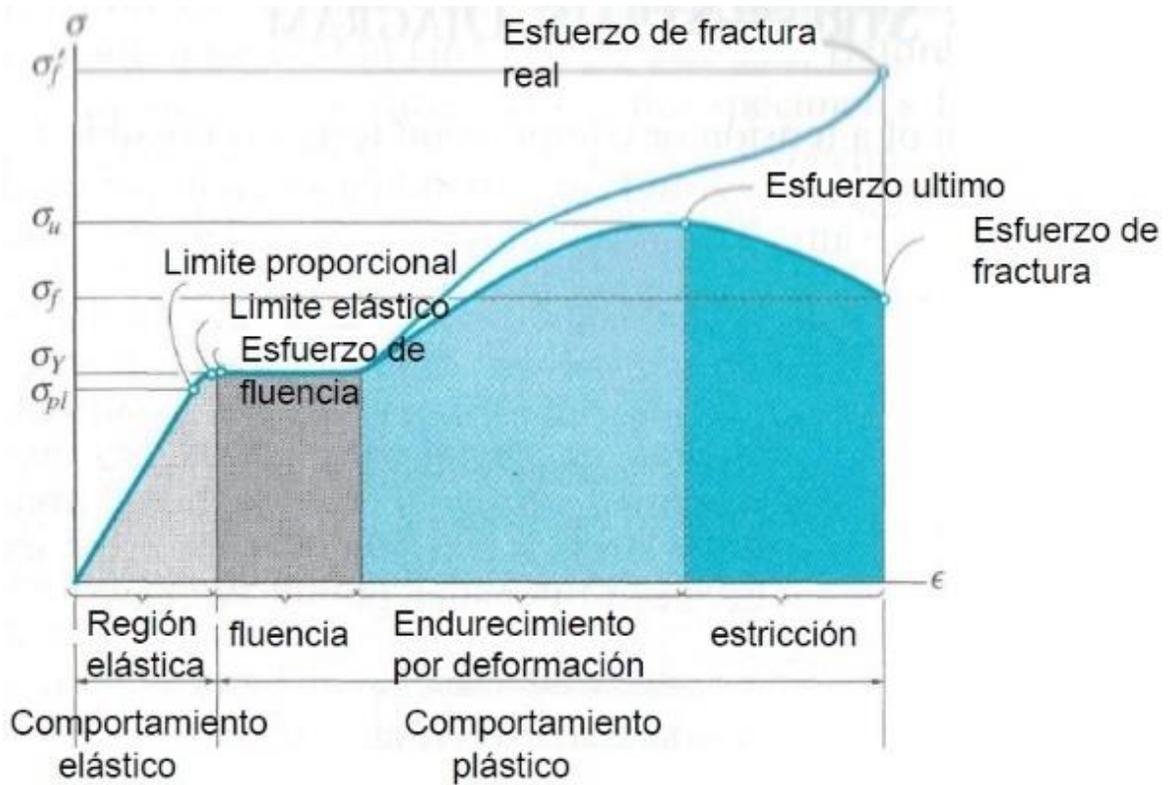


Figura II.11 Curva esfuerzo-deformación.

Los ensayos de tracción están regulados por las normas ASTM / ISO las cuales nos proveen de información y datos para llevar a cabo el ensayo adecuadamente. Los fabricantes de metales de aportación realizan pruebas de tracción en muchos de sus productos por varias razones. Como muchos usuarios finales, pueden realizar pruebas de tracción para ayudar a monitorear la calidad del proceso.

Estos fabricantes también utilizan pruebas de tracción para determinar y mantener las clasificaciones y aprobaciones de productos de agencias como la American Welding Society (AWS) o la American Bureau of Shipping (ABS). Los resultados de las pruebas de tracción generalmente están disponibles en las hojas de datos del metal de aportación y estos valores son críticos para determinar si un producto es adecuado para una aplicación.” (Hobart Filler Metals, 2024).

Tras realizar un ensayo de tracción se obtiene información cuantitativa de suma importancia para la selección del material que se haya puesto a prueba, por ejemplo, curva esfuerzo/deformación, el módulo de elasticidad, endurecimiento por deformación, zona plástica y zona elástica etc. Según (GUNT Gerätebau GmbH) El ensayo de tracción se considera uno de los métodos de ensayo más importantes en el ámbito de los ensayos de materiales destructivos.

En este ensayo, una probeta cuya sección transversal es conocida se somete a una fuerza relativamente pequeña, pero en constante aumento en dirección longitudinal hasta que se produce una rotura. Hasta que comienza el estrechamiento, en la probeta reina un estado simple de tensiones. El diagrama fuerza-extensión que aparece representado muestra la relación entre la tensión y la extensión.

Básicamente el ensayo de tracción se aplican fuerzas axiales para evaluar el comportamiento bajo carga de una probeta, la cual, es cortada y preparada con anterioridad de acuerdo a las normas estandarizadas para realizar dicho ensayo, asegurando la calidad y confiabilidad de la prueba. Fundamentalmente se analizan las siguientes dos magnitudes: esfuerzo y deformación para comprender cómo es que los materiales responden a fuerzas aplicadas.

Se denomina esfuerzo a la fuerza por unidad de área, la cual se denota con la letra griega sigma (σ) y es un parámetro que permite comparar la resistencia de los materiales, ya que establece una base común de referencia.” (Rodríguez, 2014). Es decir, el esfuerzo es la fuerza aplicada a la probeta por unidad de área al aplicarle una carga externa y se expresa de la ecuación (1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

En donde σ es el esfuerzo (MPa), F la fuerza aplicada en la probeta (N), A es el área de la sección transversal en donde se aplicó la fuerza (mm^2).

La deformación se puede entender como el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la

ocurrencia de dilatación térmica.” (Rodríguez, 2014). La deformación se define como el cambio en la forma o en el tamaño debido a una carga externa aplicada al material sometido a la prueba.

Para poder realizar el cálculo es necesario dividir la variación de la longitud dividida entre la longitud inicial, expresada con la fórmula (2).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

En donde ΔL es la diferencia o cambio de longitud (mm) L_0 : Longitud inicial (mm), dependiendo del acero y de la carga aplicada es el tipo de deformación que se presentará en el acero y dichos cambios se ven reflejados en la curva esfuerzo-deformación que se obtienen tras la realización del ensayo.

La deformación elástica es la primera fase que presenta un metal en un ensayo de tracción, en esta zona elástica el metal se deforma proporcionalmente a la fuerza aplicada y que al ser retirada este regresa a su forma inicial. La deformación elástica según (Jesús Setién Marquínez) miembro del Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales de la Universidad de Cantabria “Es una deformación no permanente, que se recupera completamente al retirar la carga que la provoca.

La Elasticidad es la propiedad que presentan los cuerpos sólidos de recuperar la forma y las dimensiones cuando cesan los esfuerzos. La zona elástica es explicada por la ley de Hooke ecuación (3).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Dónde E es el módulo de elasticidad o módulo de Young (MPa) deformación, σ es el esfuerzo (MPa). El módulo de Young o de elasticidad que se encuentra presente en la ley de Hook es una propiedad mecánica la cual indica la rigidez del material, mientras el módulo de Young sea alto el material será mucho más rígido de lo contrario este será mucho más blando.

La ley de Hooke expresa una relación lineal (constante) entre el esfuerzo y la deformación y cuando los cambios en el metal no son permanentes, es decir, que recupera su forma tras retirar la carga. Más allá del punto de cedencia el material empieza a deformarse permanentemente (zona plástica) perdiendo la relación lineal del esfuerzo-deformación.

La zona plástica es aquella región del diagrama esfuerzo-deformación donde el metal presenta una deformación permanente, es decir que, al ser retirada la carga ejercida durante el ensayo, la pieza no recuperará su forma original. El punto de cambio entre la zona elástica y la zona plástica es el límite elástico, donde el material, o en este caso del metal, en el cual los átomos sufren de un reacomodo permanente creando defectos cristalinos conocidos como dislocaciones.

A consecuencia de eso el metal sufre de lo que es conocido como endurecimiento por deformación. El endurecimiento por deformación es muy común en metales, los cuales se vuelven más duros a medida que se deforman, por lo tanto, más frágiles, dicho comportamiento puede llevar a la fractura que ocurre después de que el metal se sometió a una deformación excesiva entrando a la zona de fractura.

El endurecimiento por deformación es un fenómeno que ocurre cuando un metal se somete a una deformación plástica, lo que resulta en un aumento de su resistencia y dureza. También se conoce como endurecimiento por trabajo, trabajo en frío o endurecimiento por deformación plástica. El proceso implica la aplicación de una fuerza o tensión sobre un metal, lo que hace que ceda y se deforme. La deformación da como resultado la reordenación de la estructura cristalina del metal, lo que conduce a un aumento en el número de dislocaciones en el metal.

El aumento de las dislocaciones obstaculiza el movimiento de las dislocaciones, lo que da como resultado un aumento de la resistencia del metal". (Faster Capital, 2024). El comportamiento presente durante el endurecimiento es descrito con la fórmula de Hollomon ecuación (4).

$$\sigma = K * \varepsilon_p^n \quad (4)$$

Donde σ es el esfuerzo aplicado, K el coeficiente de endurecimiento, p es la deformación plástica, n el exponente de endurecimiento. Cuando se continúa aplicando carga sobre el material alcanza lo que es conocido como el esfuerzo máximo (max), que es el último esfuerzo antes de que la pieza sometida al ensayo de tracción se fracture y se calcula de la siguiente con la ecuación (5).

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (5)$$

Donde $\sigma_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo máximo (MPa), $F_{m\acute{a}x}$: Fuerza máxima aplicada (N) y A_0 Área inicial o sección transversal (mm^2). La tenacidad es el término utilizado para definir la capacidad de un material para deformarse plásticamente y absorber energía, como consecuencia del mecanismo de rotura. Los términos de uso ordinario como dúctil o frágil, refiriéndose a materiales conllevan en el uso ordinario la definición de qué se trata de materiales de alta tenacidad (dúctil) o baja tenacidad (frágil) (José Luis Arana Bilbao).

Una fractura frágil es un patrón de fractura en el cual el agrietamiento se ha extendido rápidamente mientras que muestra poca deformación plástica. A medida que avanza el agrietamiento, no se produce ninguna deformación plástica alrededor de la superficie fracturada. En general, las fracturas frágiles se producen en muchos materiales de acero en condiciones normales de uso.

En muchos casos, la superficie fracturada está formada por superficies de fractura de cuasi-escisión, que se observan en grandes aceros tratados térmicamente y en aceros estructurales en general ubicados en ambientes extremadamente fríos.” (Keyence, s.f.)

La fractura frágil está presente en materiales que presentan poca o nula deformación plástica antes de romperse. La fractura dúctil es un patrón de fractura que se observa en muchos materiales metálicos y muestra una gran deformación, como el estiramiento y

estrechamiento, hasta la aparición de la fractura. A través de la observación de la estructura, se pueden ver las siguientes características y patrones de fractura detallados.” (Keyence, s.f.) La fractura dúctil se presenta cuando el material ensayado sufre una gran deformación antes de romperse.

II.5 Mecánica de fractura

Las grietas presentes en un material son discontinuidades que se originan por condiciones ambientales, presiones internas, defectos existentes desde la fabricación, o incluso esfuerzos externos. La existencia de fracturas en un material propicia su fractura, de ahí la importancia de la mecánica de la fractura en la industria como lo es la automotriz. Al analizar cualquier material es muy importante tomar en cuenta las fracturas y fallas presentes ya que no existe ningún material o aleación perfectos, además que el análisis de la fractura presente en un ensayo de tracción ayuda a conocer el comportamiento real del metal en un contexto real, donde es sometido a distintos tipos de fuerzas desgaste.

La mecánica de la fractura estudia el crecimiento de grietas, la propagación de grietas y la capacidad de absorber grietas en el componente o material en condiciones de servicio (funcionamiento, vida útil, etc.). Los valores característicos del material determinados a partir de la función esfuerzo-tiempo, influyen en el diseño y la fabricación de un componente.” (Zwick Roell, s.f.)

Según sea el origen de las fracturas se pueden clasificar en intrínsecas que son el tipo de fracturas ya existentes en el material al momento de su fabricación y las grietas inducidas se producen por corrosión, factores ambientales, por impacto o por fatiga. Tal como se menciona, la importancia de la mecánica de fractura radica en el hecho de que es posible conocer el comportamiento de las grietas y fracturas que sufre el material y poder seleccionar de manera adecuada para el uso que se le desea asignar. Como tal existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La fractura frágil regularmente suele ser repentina e incluso

catastrófica, se presenta principalmente en materiales que tienen poca deformación plástica y físicamente se puede observar que la fractura es brillante y plana.

En la mecánica de fractura lineal elástica MFEL (apta para materiales frágiles), el material tiene un comportamiento lineal elástico hasta que se rompe sin deformarse (propagación de grieta inestable). Un valor característico clásico de la mecánica de fractura elástica lineal es el factor crítico de intensidad de tensiones K_{IC} , que describe la intensidad de tensiones (K) crítica (C) en modo de apertura de grieta.” (Zwick Roell, s.f.).

En el caso de la fractura dúctil, si, por el contrario, el material presenta este tipo, es decir, una deformación plástica alrededor del pico de la grieta, se emplea el concepto de mecánica de la fractura elastoplástica. En este contexto, se define cómo se determinan los valores característicos: a través de la energía acumulada en el área alrededor del pico de la grieta (concepto integral J), o bien a través del desplazamiento de apertura de los picos de grieta (CTOD "crack tip opening displacement").” (Zwick Roell, s.f.).

Los materiales que presentan fractura dúctil sufren una deformación significativa antes de fracturarse o romperse, por lo tanto, físicamente la superficie de la fractura suele ser opaca y rugosa, presentando lo que se conoce como conos, copas o cuellos de botella. La forma en que las grietas se propagan y se expanden en materiales frágiles se clasifican de los siguientes modos de agrietamiento.

Uno, la fractura frágil de un material consiste de dos fases: iniciación y propagación de la grieta. Hay tres modos básicos de propagación (dependiendo del tipo de desplazamiento). El modo I es el modo de apertura. Las superficies de la grieta se separan. Modo II: modo de deslizamiento. Las grietas superficiales se mueven (deslizan) normales al extremo de la grieta permaneciendo en su plano y el Modo III: modo de rasgado. Las grietas superficiales se mueven paralelas al extremo de la grieta y regresando a su estado original.” (Salazar, 2013).

Muchos de los factores que provocan la propagación de grietas en los materiales son principalmente debido al tamaño y forma de grietas ya existentes en el material, la

temperatura y la aplicación rápida de carga sobre el material ensayado puede promover el crecimiento de grietas.

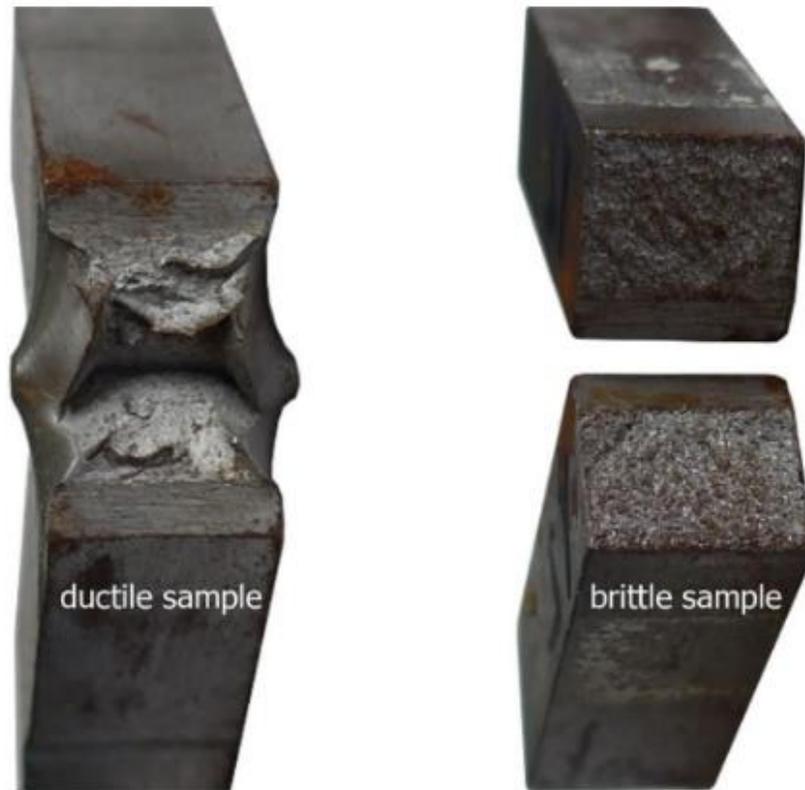


Figura II.12. Tipos de fractura dúctil (a la izquierda) y frágil (derecha), tomado del sitio de (Gold Supplier.com, 2024).

II.6 Probetas para ensayo de tracción.

Para realizar el ensayo de tracción las probetas son una parte esencial del proceso que representan al material para poder evaluar las propiedades mecánicas del mismo. Estas muestras deben ser preparadas con ciertos estándares delimitados, de esta forma obtener información importante sobre el material tales como el límite elástico, la resistencia máxima a la tracción, el módulo de Young. Es importante alinear la probeta a los parámetros ya

establecidos para obtener datos de alta confiabilidad y precisión, con la finalidad de que puedan ser comparados y reproducibles.

Tanto la forma como las dimensiones de la probeta dependen de la normativa aplicada, en este caso, al tratarse de un acero se utiliza la norma ASTM E8/E8M. Existen distintos tipos de probetas, cilíndricas, planas o de formas especializadas, esto depende de los que se quiera analizar. Las dimensiones propuestas por la norma son para asegurar que las tensiones y deformaciones sean distribuidas uniformemente a lo largo de la probeta, de no ser así el ensayo no tendrá validez al no ser representativo.

Tal como se menciona en la norma (ASTM) las muestras de prueba mal preparadas a menudo son la razón de pruebas insatisfactorias y resultados incorrectos. Por lo tanto, es importante tener cuidado en la preparación de muestras, particularmente en el mecanizado, para maximizar la precisión y minimizar el sesgo en los resultados de las pruebas. La sección reducida, incluidos los filetes de las muestras preparadas, debe estar libre de trabajo en frío, muescas, marcas de vibración, ranuras, hendiduras, rebabas, superficies o bordes rugosos, sobrecalentamiento o cualquier otra condición que pueda afectar perjudicialmente las propiedades a medir.

II.7 Tipos de probetas.

Las probetas para ensayos de tracción suelen ser muy variadas dependiendo del material y la forma de la pieza que se quiera analizar. Probetas cilíndricas figura II.13 son muy comunes en metales y son muy fáciles de maquinar. Las probetas cilíndricas se utilizan cuando el material a analizar cuenta con un radio.

Las probetas planas como se presentan en la figura II.14 normalmente se utilizan para láminas y piezas planas, en este documento son las que se utilizarán. Las Probetas especiales son maquinadas para materiales con figuras complejas o especificaciones muy concretas para su análisis.

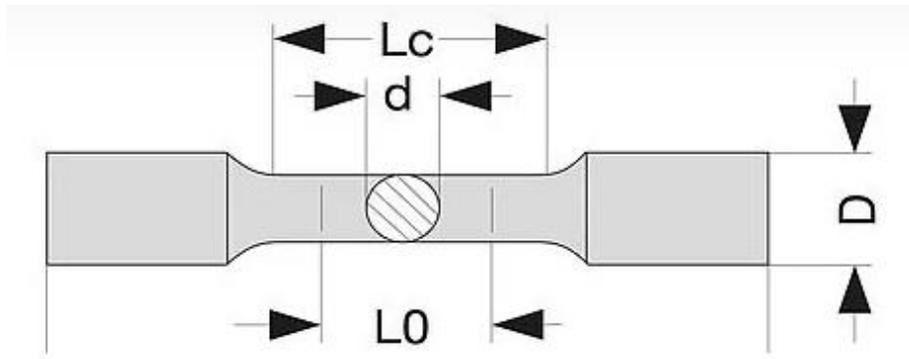


Figura II.13 Probeta cilíndrica obtenida del sitio de Zwick Roell.

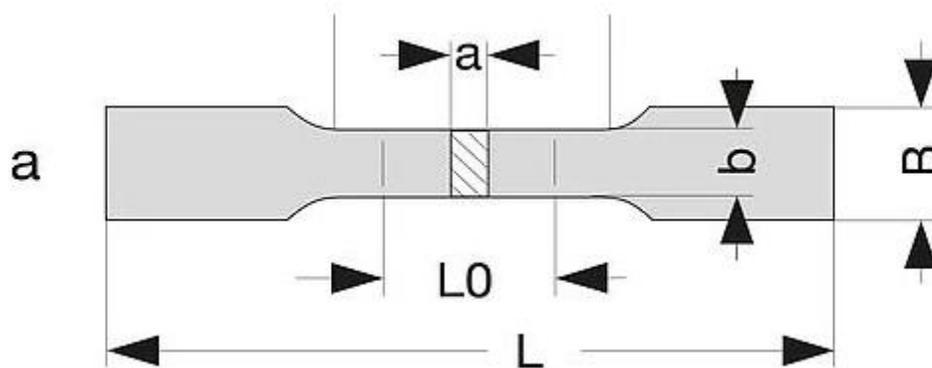


Figura II.14 Probeta plana tomada del sitio de Zwick Roell

Como se mencionó con anterioridad las dimensiones son esenciales para que el ensayo sea representativo del material a analizar y tener aproximaciones de su comportamiento en una situación aplicada. A continuación, se muestran algunos de los parámetros inscritos en la norma ASTM E8/E8M- 16 figura II.15 y tabla II.2.

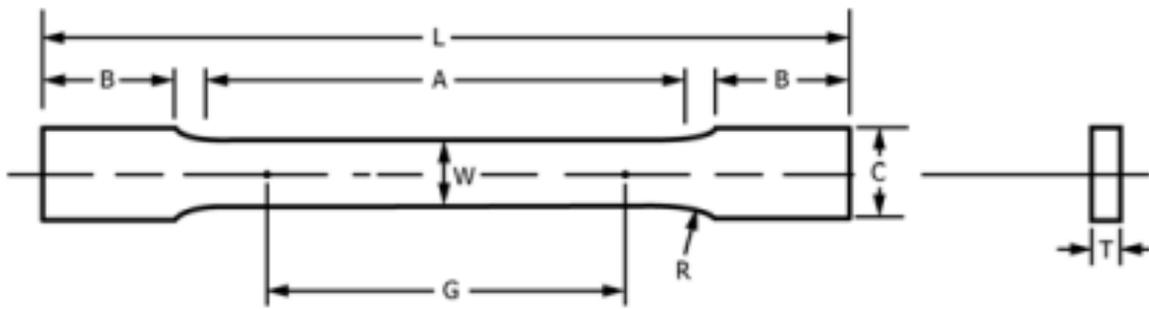


Figura II.15 Probeta plana con las dimensiones especificadas en la tabla inferior.

Tabla II.2 Especificaciones de las dimensiones de la probeta.

	Probetas Estándar	Probetas Reducidas
	Tipo Placa, 40 mm (1.500 in) de ancho	Tipo Lámina, 12,5 mm (0.500 in) de ancho
Dimensión	mm [in.]	mm [in.]
	<ul style="list-style-type: none"> • G - Longitud de calibración (Notas 1 y 2) 200 ± 0.2 [8.00 ± 0.01] 50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005] 25 ± 0.1 [1.000 ± 0.003] • W - Ancho (Notas 3 y 4) 40 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250] 12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010] 6 ± 0.1 [0.250 ± 0.005] • T - Espesor (Nota 5) Espesor del material • R - Radio de los filetes, mín. (Nota 6) 25 [1] 12.5 [0.500] 6 [0.250] • L - Longitud total, mín. (Notas 2, 7 y 8) 450 [18] 200 [8] 100 [4] • A - Longitud de la sección paralela reducida, mín. 225 [9] 57 [2.25] 32 [1.25] • B - Longitud de la sección de agarre, mín. (Nota 9) 75 [3] 50 [2] 30 [1.25] • C - Ancho de la sección de agarre, aproximado (Notas 4 y 9) 50 [2] 20 [0.750] 10 [0.375] 	

Donde G representa la longitud de calibración, una medida estándar utilizada para evaluar el área donde ocurre la deformación durante los ensayos. Las tolerancias y ajustes pueden variar según las especificaciones del ensayo. Tomado de (ASTM)

Una vez que se tienen las probetas de las dimensiones y acabados dictados por la norma utilizada esta es llevada al equipo para realizar el ensayo de tracción. La probeta se coloca en la máquina de tracción y se sostiene con dos mordazas que aprietan la parte más ancha de la probeta para que en la zona más estrecha ocurra la deformación y posterior fractura de la pieza. La máquina va aplicando carga progresivamente sobre la probeta hasta que se rompe por completo, la deformación se mide con extensómetro y la fuerza aplicada con un sensor de carga.

Estos datos son procesados posteriormente para construir el diagrama esfuerzo-deformación, que permite observar de una forma simple el comportamiento del material y obtener información como la resistencia a la tracción, el límite elástico, el porcentaje de elongación etc. Después de que el ensayo es realizado es posible comprender el comportamiento general del material bajo ciertas circunstancias, por lo tanto, es posible saber si es adecuado para el uso que se le quiera asignar.

En este trabajo de investigación se tomó como muestra una lámina de acero DP100 para uso automotriz, por consiguiente, la prueba de tracción revisará el comportamiento del metal en la dirección de rolado y en adición se realizará el ensayo a 90 y 45 grados de la dirección de rolado, con la finalidad de revisar los distintos comportamientos presentes en dichas direcciones.

Los errores y limitantes existentes en el ensayo de tracción son cuestiones que se deben considerar al realizar un ensayo de tracción es muy importante considerar los errores que puedan existir, para disminuirlos en la medida de lo posible para obtener un ensayo confiable y representativo. Muchos de los problemas o fallas presentes en el ensayo de tracción suelen aparecer desde la probeta, ya sea porque el material de fábrica cuenta con algunos defectos internos o el maquinado de la probeta no fue el adecuado.

Como ya se ha indicado, la calidad de la probeta es crucial a la hora de obtener buenos resultados en los ensayos de resistencia a la tracción. Todas las normas de ensayo internacionales: EN, ASTM, GHOST, ISO, DIN, JIS advierten que el daño causado en los bordes de la probeta (endurecimiento en frío) debe ser eliminado previamente al ensayo de tracción. Desgraciadamente las normas no detallan cómo ha de hacerse este procedimiento (Ibertest).

Para evitar este tipo de errores existen muchos equipos que sirven para corregir probetas, pero estos equipos no son accesibles para todo tipo de usuarios, principalmente a los que no están presentes en investigaciones de grandes industrias. Otro de los factores que afectan los resultados del ensayo es la sujeción de la probeta al equipo de tracción. Primero se debe asegurar que la probeta esté correctamente alineada con la mordaza,

II.8 Teoría del comportamiento mecánico del acero.

Como ha sido mencionado con anterioridad en este documento, la estructura presente en los aceros afecta directamente las propiedades mecánicas del mismo. El hierro en el acero comúnmente presenta una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC Body Centered Cubic) o cúbica centrada en las caras (FCC Face Centered Cubic) figura II.16 y II.17, dichas estructuras se ven reflejadas en las propiedades del acero, como la resistencia, ductilidad y fragilidad.

Los metales que tienen una estructura BCC suelen ser más duros y menos maleables que los metales compactos como el oro. Cuando el metal se deforma, los planos de los átomos deben deslizarse unos sobre otros, y esto es más difícil en la estructura BCC. Cabe destacar que existen otros mecanismos importantes para el endurecimiento de los materiales, como la introducción de impurezas o defectos que dificultan el deslizamiento.” (Nde-ed, s.f.).

En la estructura fcc (y en la estructura hcp), los átomos pueden agruparse más juntos que en la estructura bcc. Los átomos de una capa se anidan en el espacio vacío entre los átomos de

la capa adyacente (Nde-ed, s.f.). La tabla II.3 presenta información respecto a la ductilidad de ambas estructuras FCC y BCC, así como su densidad de empaquetamiento y número de coordinación.

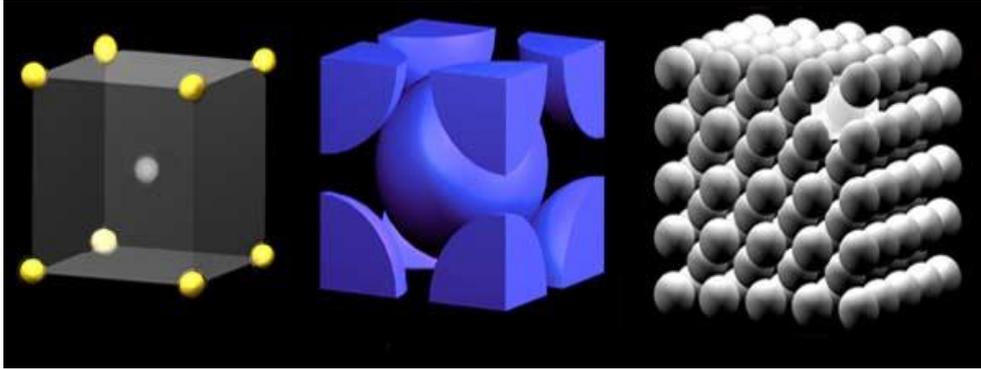


Figura II.16 Representación de la estructura cristalina BCC tomada del sitio de Iowa State University.

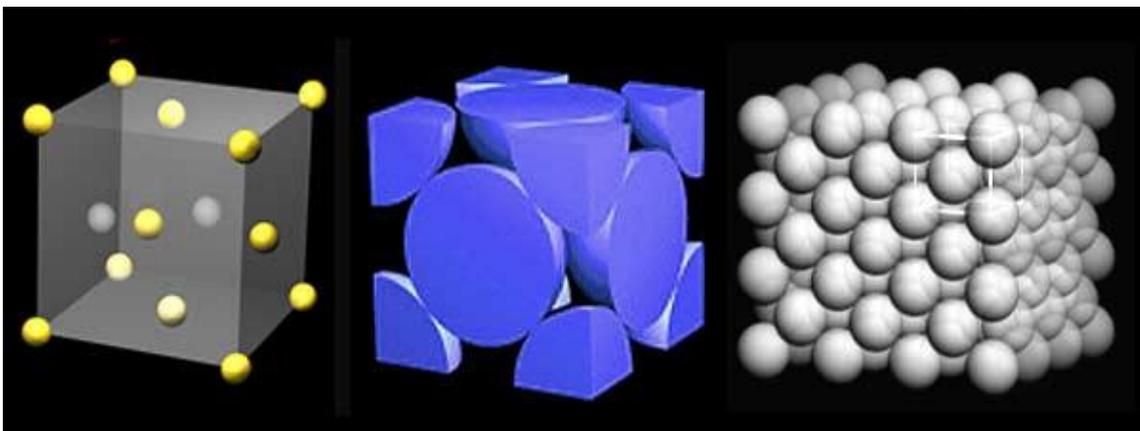


Figura II.17 Representación de sistema cristalino FCC toma del sitio de Iowa State University.

Tabla II.3 Tabla comparativa de ambos sistemas cristalinos.

Propiedades	BCC (Cúbica centrada en el cuerpo)	FCC (Cúbica centrada en las caras)
Ductilidad	Mayor ductilidad	Menor Ductilidad
Densidad de empaquetamiento	68%	74%
Número de coordinación	8	12

Capítulo III Experimentación

III.1 Preparación de muestra para ataque químico y análisis metalográfico.

Tanto las muestras del acero DP100 como las del acero HX220LAD sufrieron un proceso de laminación y rolado en frío. Para su manejo se cortaron pequeñas porciones de cada lámina (0.25 cm^2), con el fin de facilitar el análisis. Se montaron 8 muestras de cada acero en resina en dos probetas distintas, cuatro muestras de acero por probeta, se dejó curar la resina por aproximadamente 24 hrs.

Las probetas fueron rotuladas como muestra A y muestra B para su fácil identificación. Posterior a ello se comenzó con el desbaste manual de ambas probetas, utilizando lijas de 60, 200, 400, 800, 1200 y 1500. El desbaste se realizó de forma vertical sobre la lija, en el cambio de lija las probetas se giraban noventa grados con el fin de asegurar que las líneas de desbaste no tuvieran sólo una dirección.

Una vez terminado el desbaste con la última lija se procedió a pulir con un paño y alúmina durante aproximadamente 15 minutos para obtener el acabado espejo para el posterior ataque químico. Para el ataque químico se decidió que se haría con dos reactivos diferentes para observar las fases reveladas con cada uno. Los reactivos utilizados fueron nital 5 % y picral 5 %.

Primero se hizo un ataque de prueba para ver el tiempo requerido para revelar la microestructura de las muestras. Al inicio se sumergió la superficie de las muestras en el reactivo por algunos segundos, se enjuaga y se seca. El acero HX220LAD presentó reacción al nital 5 % y al picral 5 %, por lo observado era necesario un poco más de tiempo de ataque. Sin embargo, para el acero DP1000 el ataque no se llevó a cabo por lo que se prolongó el tiempo de ataque.

Se pulieron nuevamente las piezas para replicar el ataque químico en ambas muestras, tanto con picral como con nital. Al replicar el ataque químico y revisar las muestras en el microscopio no se vieron muchos cambios respecto al primer ataque, al no obtener resultados favorables se cambió la técnica de ataque. Se colocó un poco de reactivo, tanto nital como picral en cada muestra y se dejaba reaccionar hasta notar un cambio en la superficie de las muestras para posteriormente enjuagar y secar.

Capítulo IV Resultados y discusión.

IV.1 Análisis metalográfico de los aceros evaluados.

Después de haber llevado a cabo la inspección de las probetas de acero se observaron en un microscopio obteniendo los datos mostrados en la figura IV.1. Tras analizar los resultados obtenidos con ambos reactivos, se observa que el picral es el que más favoreció las microestructuras reveladas, tanto las fases como los límites de grano se observan con mucho mejor detenimiento, de ahí la importancia de haber realizado la prueba con dos reactivos diferentes, ya que los resultados pueden ser comparados y dar un mejor análisis de lo observado a través del microscopio.

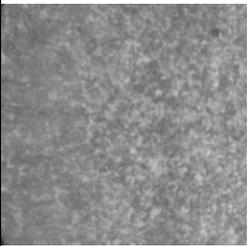
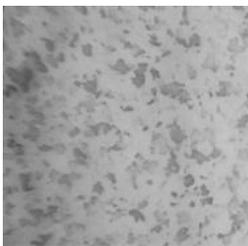
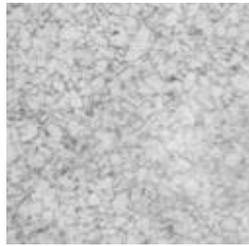
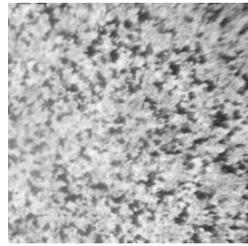
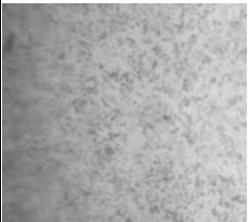
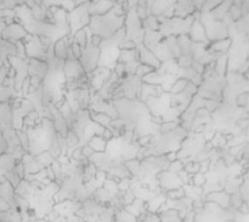
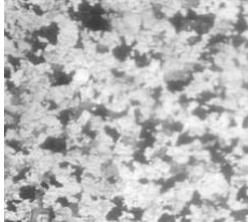
Aumentos	DP1000		HX220LAD	
	Nital	Picral	Nital	Picral
100X				
400X				

Figura IV.1 Análisis metalográfico de los aceros DP1000 y HX220LAD empleando Nital y picral.

De igual forma se hizo un análisis a distintos aumentos, con la finalidad de observar con detenimiento los granos y las fases que conforman los aceros en cuestión. La figura IV.2 muestra un análisis más detallado de las microestructuras obtenidas, las fases, granos y propiedades mecánicas que se puedan inferir con base en la metalografía de los aceros.

Como se puede observar en la microestructura del acero DP1000 nos revela una microestructura dual característica, donde están presentes tanto la ferrita (zona blanca) como las islas de martensita (zona oscura), ambas microestructuras están distribuidas de manera homogénea permitiendo un equilibrio entre ductilidad y resistencia.

La matriz de ferrita aporta ductilidad y maleabilidad a la pieza, mientras que las islas de martensita aportan resistencia mecánica, por lo tanto, ambas fases aportan alta resistencia y ductilidad. Para realizar el análisis de la composición de las fases en la microestructura se colocó la microestructura en un programa llamado ImageJ con el cual realiza el conteo de los píxeles detectados para conocer el contenido aproximado de cada fase presente en la microestructura tal como se observa en la figura IV.3.

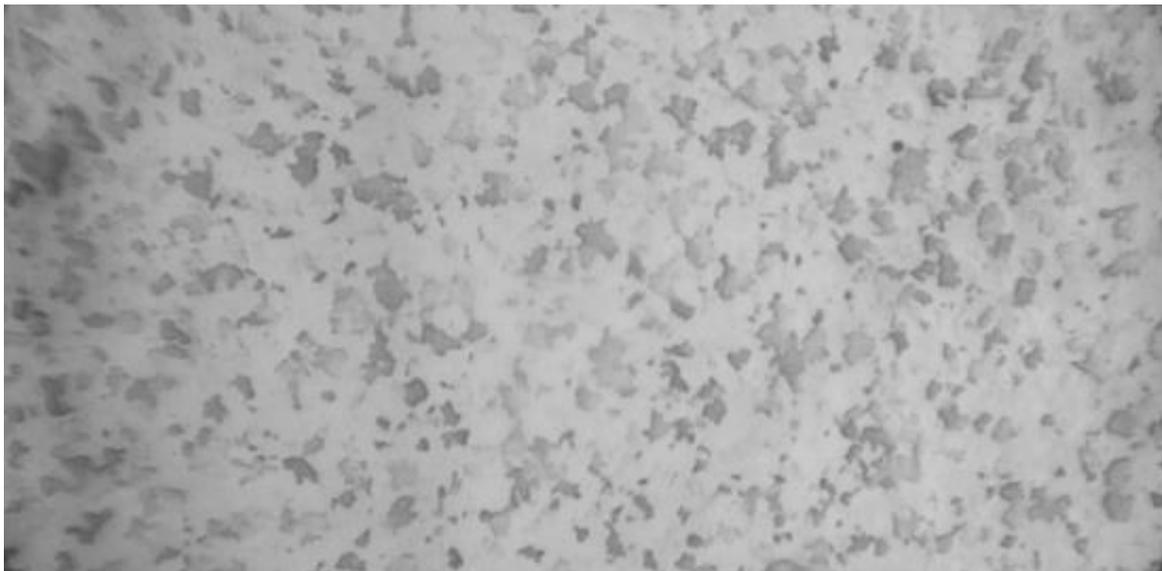


Figura IV.2 Microestructura de un acero DP1000, tomada 100X, atacada con picral.



Figura IV.3 Ajustes y saturación para definición de las fases del acero *DP1000*

La figura IV.4 muestra la microestructura ajustada empleando la aplicación imageJ para la distinción de las principales fases presentes en la microestructura,

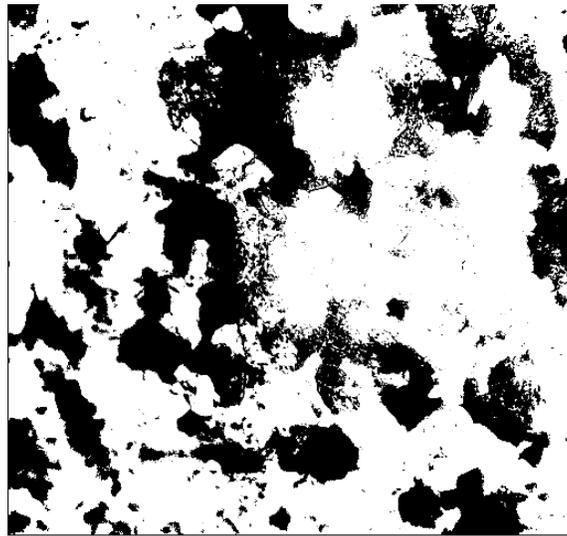


Figura IV.4 Microestructura ajustada con la aplicación ImageJ para distinguir las fases presentes en la microestructura del acero DP1000

Una vez realizado el análisis en el programa imageJ se obtuvieron los resultados observados en la tabla IV.1

Tabla IV.1 Datos obtenidos en el programa ImageJ

	No. de píxeles	Intensidad en escala de grises	Porcentaje de fase
1	1500860	213.7	90.26100553
2	161940	166	9.738994467
Total		1662800	

El programa analiza la imagen y detecta la intensidad en la escala de grises presentes en la microestructura, los valores más cercanos a 0 son más oscuros y los más cercanos a 250 son mucho más blancos, por lo tanto, el valor en la tabla IV.1 de 213.7 representa la fase de la ferrita y el valor de 166 pertenece a las islas de martensita.

Eso quiere decir que en hay una presencia del 90.26 % de ferrita y un 9.74 % de martensita, por lo tanto, se puede decir que obtenemos un acero que ofrece buena ductilidad gracias a la presencia de la ferrita y resistencia por la adecuada distribución de las islas de martensita.

Para usos prácticos de este trabajo se decidió analizar otro acero para comparar ambos y poder seleccionar el material idóneo para el uso requerido. El acero en cuestión se trata de un HX220LAD microestructura de la figura IV.5, un acero de alta resistencia laminado en frío que usualmente es utilizado en aplicaciones automotrices o estructurales. A diferencia del acero DP1000 que cuenta con islas de martensita en una matriz de ferrita.

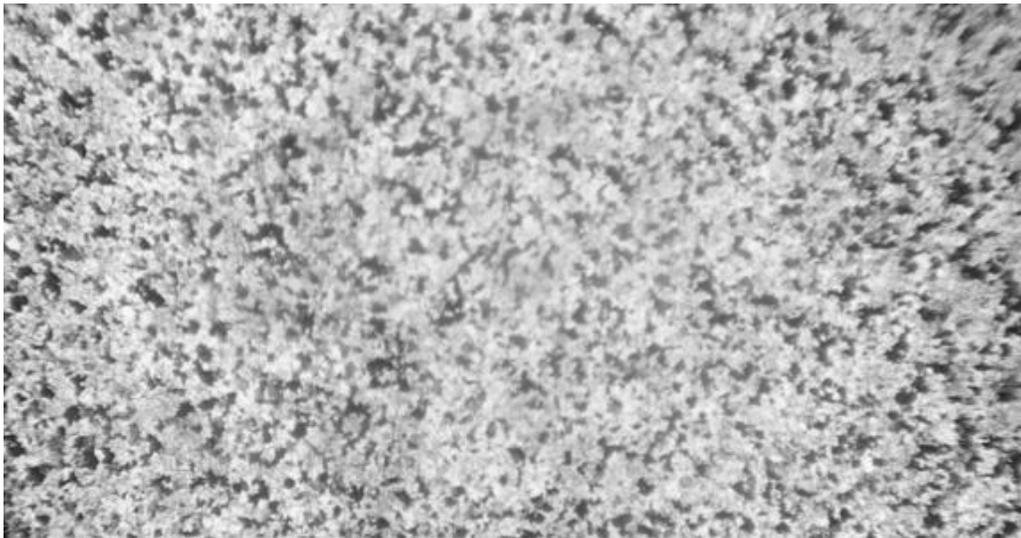


Figura IV.5 Microestructura de un acero HX220LAD, donde se pueden observar ferrita (fase blanca), bainita (fase gris claro) y martensita (fase oscura).

Se realizó el mismo análisis con el acero HX220LAD con la finalidad de poder hacer un conteo aproximado de las fases presentes en dicho acero para poder realizar la comparativa entre el acero DP1000 y el acero HX220LAD.

Se realizó un análisis similar con el software ImageJ con el acero HX220LAD con la finalidad de poder hacer un conteo aproximado de las fases presentes en dicho acero para poder realizar la comparativa entre el acero DP1000 y el acero HX220LAD. La figura IV.6 muestra la microestructura de un acero HX220LAD, donde se pueden observar ferrita (fase blanca), bainita (fase gris claro) y martensita (fase oscura). La tabla IV.2 presenta los resultados del análisis de la metalografía, “1” representa a la ferrita, “2” representa a la bainita y algunos rastros de perlita.

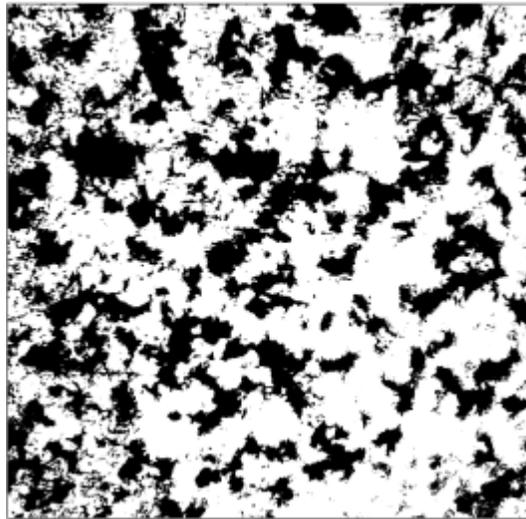


Figura IV.6 Microestructura de un acero HX220LAD, ferrita (fase blanca), bainita (fase gris claro) y martensita (fase oscura)

Tabla IV.2 Resultados del análisis de la metalografía, 1 ferrita, 2 bainita y algunos rastros de perlita.

	Intensidad en escala de grises	Porcentaje de fase
1	182.45	71.552
2	166.21	28.448
Total		100

En tanto la figura IV.7 muestra los ajustes y saturación para la definición de las fases del acero HX220LAD, los cuales se realizan en el software ImageJ.

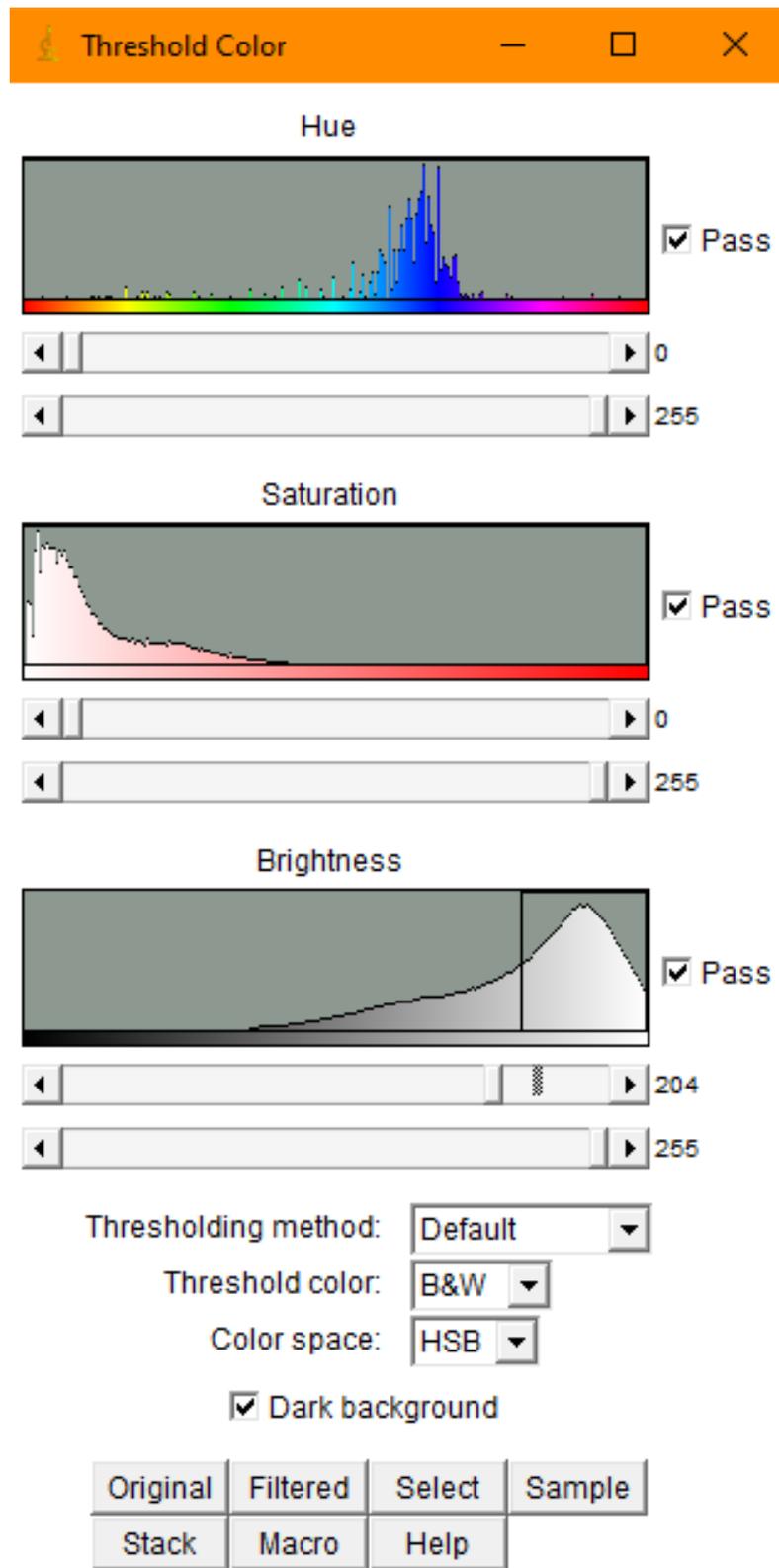


Figura IV.7 Ajustes y saturación para definición de las fases del acero HX220LAD

Analizando los resultados el porcentaje de bainita presente en el acero HX220LAD es mayor que el porcentaje de martensita presente en el acero DP1000, por lo tanto, el acero HX220LAD es mucho más fácil de conformar y de soldar, es decir, que las propiedades conferidas en este acero es proporcionada por diversos precipitados presentes y la existencia de bainita que aumenta la resistencia del mismo, pero sin comprometer demasiado su formabilidad.

A pesar de las posibles similitudes de ambos aceros y que sus aplicaciones van dirigidas a los mismos sectores industriales hay una clara diferencia entre ambos. En la industria automotriz hay muchos problemas existentes en cuestión de propiedades mecánicas de las aleaciones ocupadas para la fabricación de automóviles, principalmente se busca un balance entre resistencia y formabilidad, es decir, se busca un material capaz de resistir grandes cargas, pero que a su vez sea lo suficientemente flexible para poder conformar plásticamente.

En la industria de las aleaciones los aceros se fabrican en base a los requerimientos del cliente o el uso final que se desea darles, podemos trabajar con distintos aspectos para crear o modificar aleaciones ya existentes. Para modificar una aleación, en este caso, un acero, podemos hacer uso de los aspectos mencionados en el esquema de la figura IV.8. Teniendo en cuenta las características deseadas por el cliente y el fin con el que se desea producir el acero, con los parámetros con los que se va a trabajar para su fabricación.

En este caso se tienen dos aceros que se aplican a la misma industria, por lo tanto, es necesario considerar las propiedades solicitadas con anterioridad. Por un lado, tenemos al HX220LAD que, por la presencia de bainita, es muy flexible sin comprometer demasiado la resistencia y en cambio, el acero DP1000 es mucho más ligero y resistente, la presencia de martensita distribuidas en islas en una matriz de ferrita, lo cual ayuda a mejorar la resistencia y la maquinabilidad del acero. Al tratarse de temas de seguridad y de zonas que requieren alta resistencia, es la mejor opción.

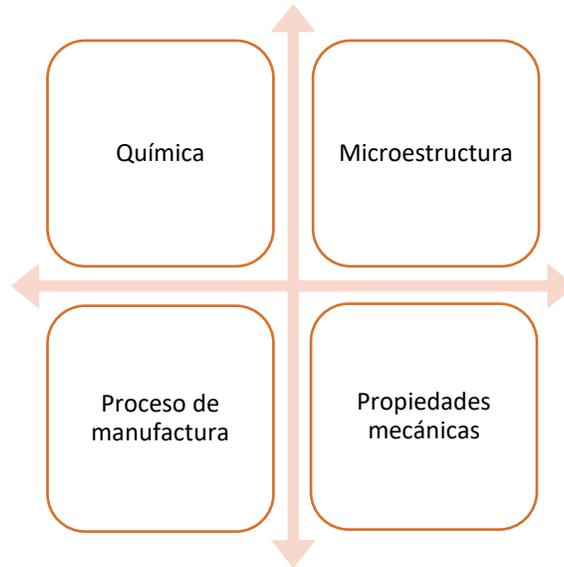


Figura IV.8. Aspectos básicos para fabricar una aleación.

IV.2 Ensayo y resultados de la prueba de tracción

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la caracterización de un acero DP1000 el cual es ampliamente utilizado en la industria automotriz debido a sus propiedades de resistencia y ductilidad que lo hacen adecuado para dicha aplicación. El propósito principal de la caracterización es conocer y cuantificar las características y propiedades mecánicas presentes en el acero, de esta forma poder hacer una adecuada selección del material y además poder justificar su aplicación en lugar de otros aceros con propiedades y usos similares.

Para llevar a cabo el ensayo de tracción se maquinaron las probetas con las siguientes medidas establecidas. La figura IV.9 muestra las dimensiones de las probetas utilizadas basadas en la norma ASTM E8, imagen tomada del sitio de (Zwick Roell, s.f.)

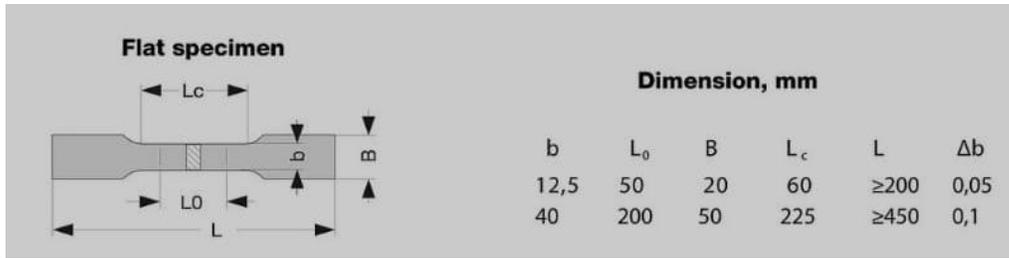


Figura IV.9 Dimensiones de las probetas utilizadas basadas en la norma ASTM E8, imagen tomada del sitio de (Zwick Roell, s.f.).

Con la finalidad de tener un análisis más profundo se optó no sólo por hacer el ensayo en la dirección de rolado de la lámina, sino también a 90° y 45° con respecto a la dirección de rolado (0°) como se muestra en la figura IV.10.



Figura IV.10 Distribución de las probetas y la dirección de corte.

Las probetas fueron cortadas con láser debido a las características del metal, por lo tanto, el corte láser es mucho más sencillo que un corte mecánico, de esta forma, se evitaron algunos de los posibles fallos en el ensayo, como la presencia de fracturas indeseadas o que la geometría sea inadecuada invalidando de esta forma el ensayo. La figura IV.11 muestra las probetas después de ser utilizadas en el ensayo de tracción.

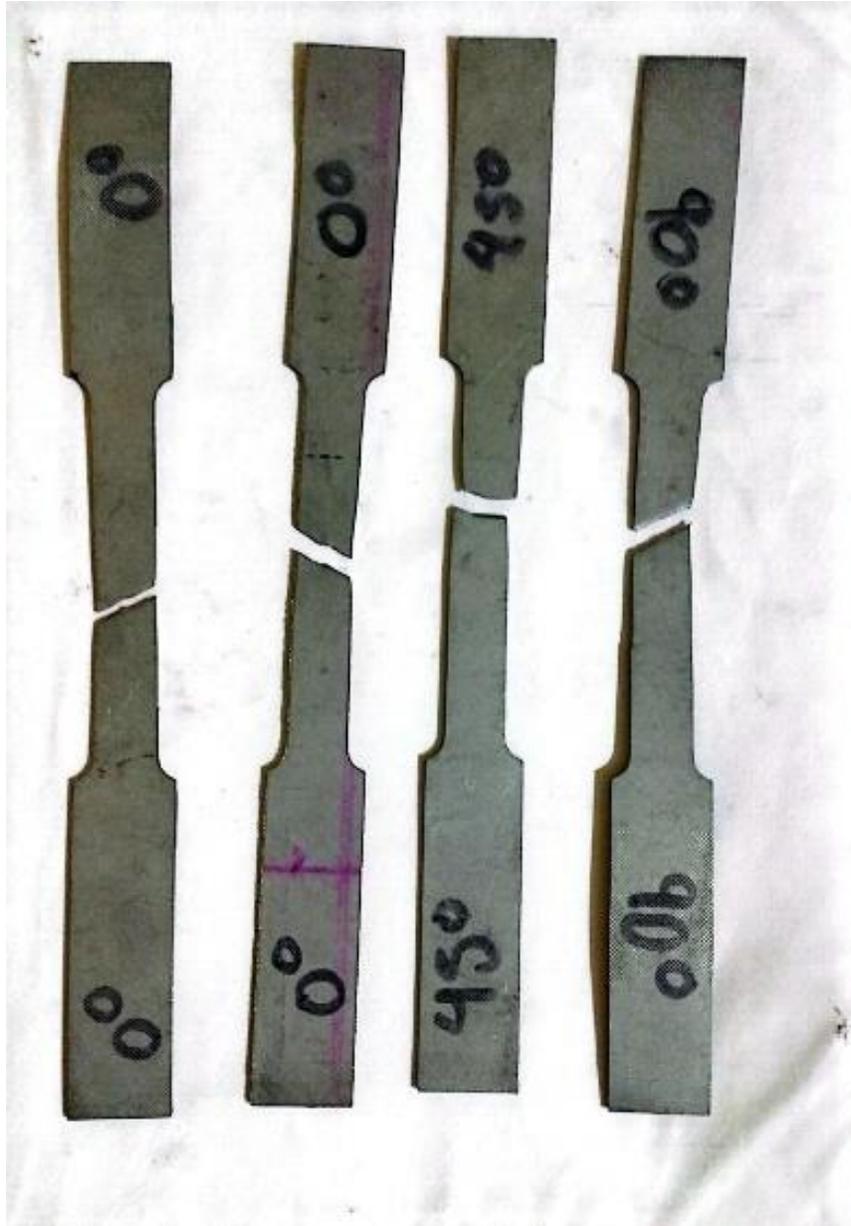
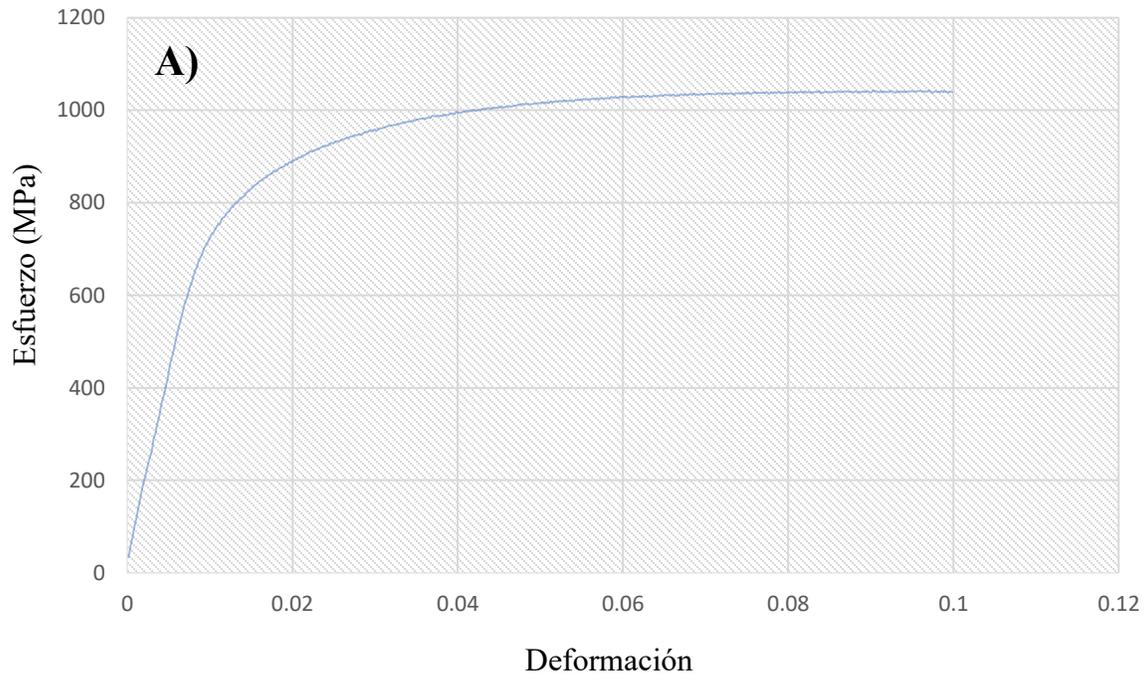


Figura IV.11 Probetas después de ser utilizadas en el ensayo de tracción.

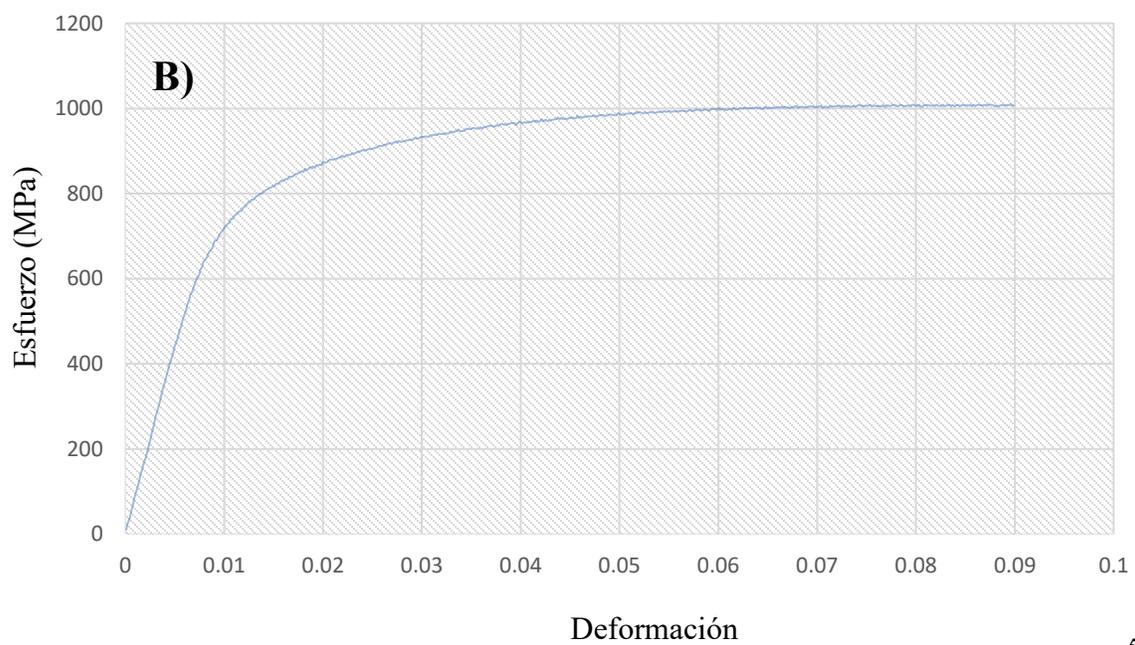
De las pruebas del ensayo de tracción se obtuvieron las siguientes curvas de esfuerzo-deformación de acuerdo a los cortes de la probeta realizados a la placa de acero figura IV.12

A) 0°, B) 45° C) 90 °

Curva a 0°



Curva a 45°



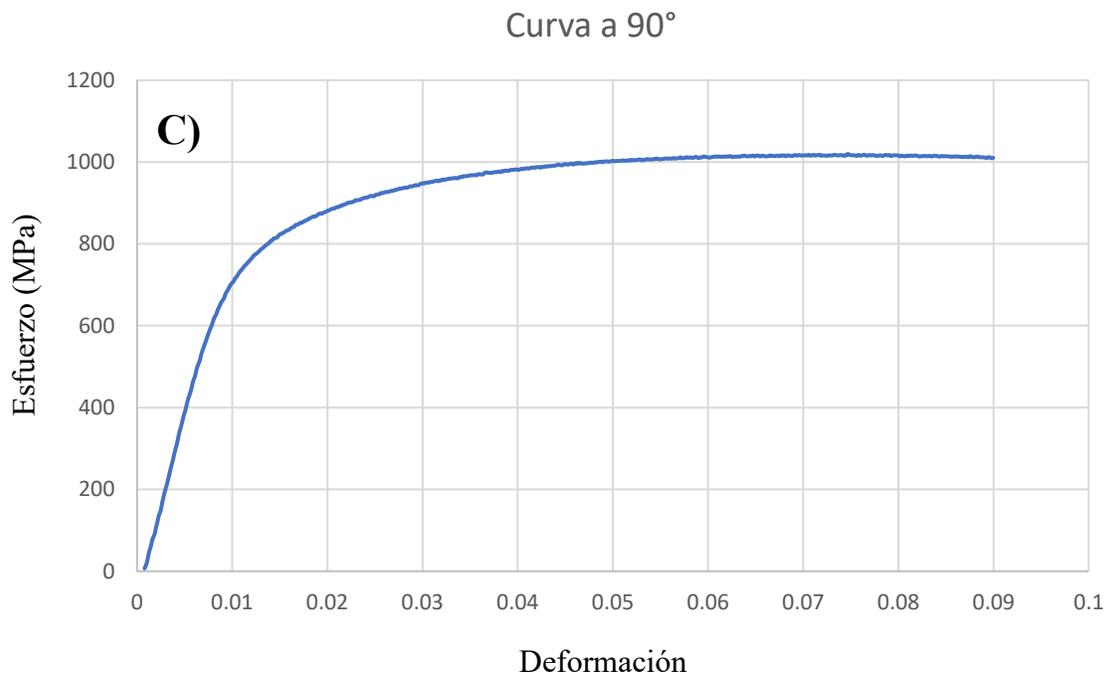


Figura IV.12 Curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo de tracción de la probeta con dirección A) 0°, B) 45 ° y C) 90°.

Se analizaron cada una de las gráficas para obtener los datos pertinentes y ejecutar las operaciones que permitan conocer la información de relevancia del comportamiento del acero como el módulo de Young, el punto de fluencia (Yield Point), (Tensile Strength) etc. Para conocer el Yield Point (Punto de fluencia) del acero que se está analizando es necesario observar de cerca cada una de las gráficas y delimitar el YP, la zona en donde el comportamiento del acero deja de ser lineal, es decir, delimita la zona elástica de la zona plástica figura IV.13 A) y B).

En este caso, se hizo uso del límite elástico convencional, en el cuál, se traza una línea desde el 0.002% hasta que cruza con la curva, el punto de unión es lo que se conoce como YP.

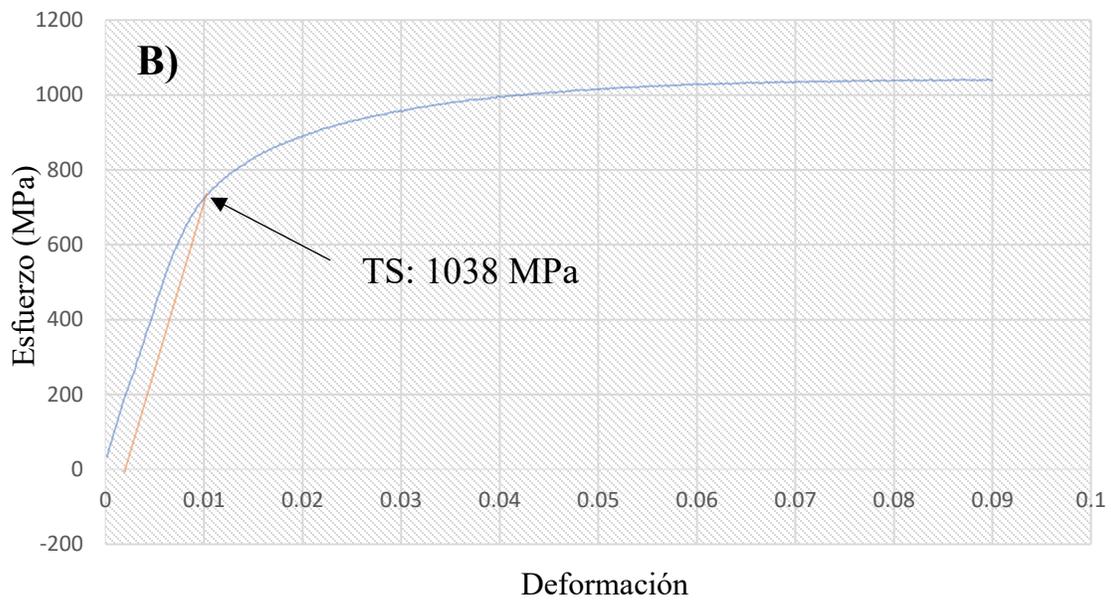
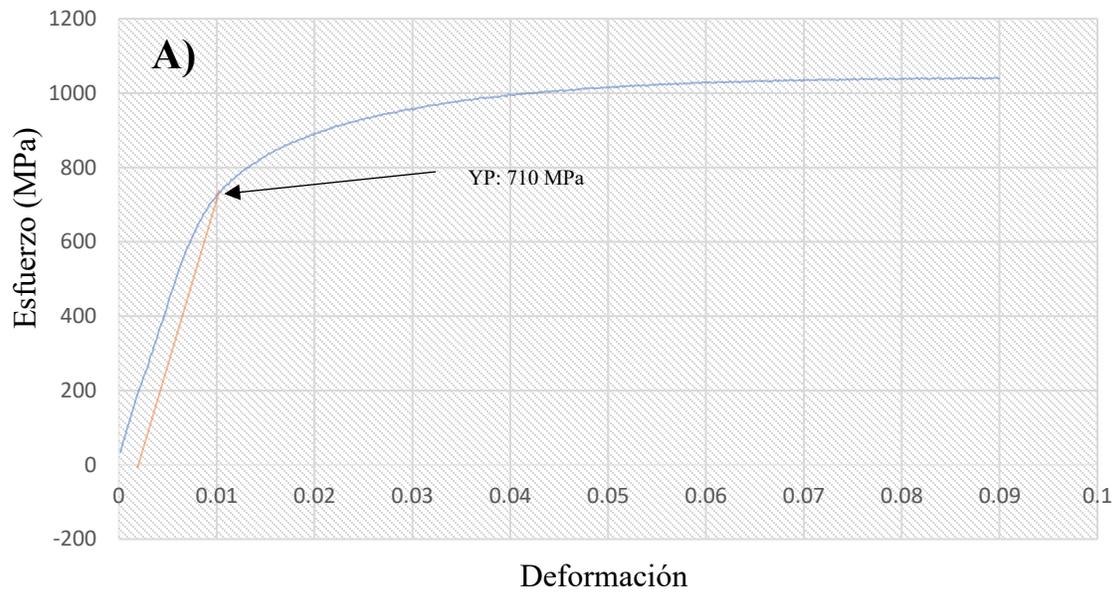


Figura IV.13 ubicación del punto de fluencia (YP) en la curva esfuerzo - deformación.

Ya conocido este dato es posible hacer el cálculo del módulo de Young que es representado con la letra E, para ello es necesario hacer el cálculo del mismo, utilizando la siguiente fórmula.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

Donde: E es el módulo de Young, σ es el esfuerzo, ϵ es la deformación. En este caso, se calculó el módulo de Young con la diferencia tanto de esfuerzo como de deformación, es decir, utilizando los datos de la zona elástica desde el YP hasta el punto inicial de la curva, como se muestra a continuación.

$$E = \frac{(\sigma_{YP} - \sigma_0)}{(\epsilon_{YP} - \epsilon_0)} \quad (7)$$

Donde σ_{YP} es el esfuerzo en el YP, σ_0 es el esfuerzo inicial, ϵ_{YP} es la deformación en el YP ϵ_0 es la deformación inicial En el caso de la resistencia a la tracción (Tensile Strength TS), se utilizó el máximo punto alcanzado en la curva, a fin de conocer cuál es la resistencia máxima alcanzada por el acero ensayado.

Posterior a ello se procedió al cálculo del % elongación, para el cual, se hizo uso de la siguiente fórmula.

$$\% \text{ elongación} = \frac{L_f * 100}{L_0} - 100 \quad (8)$$

Donde, L_f : es la longitud que alcanza la probeta al finalizar el ensayo, L_0 es la longitud inicial de la probeta antes del ensayo. Para el cálculo del exponente por endurecimiento conocido como n, el cual describe como la resistencia de un material aumenta en la deformación plástica de un material, en este caso, de un acero. Este comportamiento se ve descrito en la ley de Hollom.

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad (9)$$

Donde, K es el coeficiente de resistencia, ϵ es la deformación plástica verdadera, n es el exponente de endurecimiento por deformación, σ es el esfuerzo verdadero. Se realiza el despeje para obtener la fórmula del cálculo de n, aplicando propiedades logarítmicas como se muestra a continuación.

$$\ln(\sigma_{verdadero}) = \ln(K) + n * \ln(\epsilon_{verdadero}) \quad (10)$$

La configuración de la fórmula anterior es muy similar a la de la ecuación de la recta.

$$y = mx + b \quad (11)$$

Por lo tanto, $m = n$ (pendiente de la recta), $x = \ln(\epsilon)$, $y = \ln(\sigma)$, $b = \ln(K)$ la intersección. Por lo tanto, es necesario calcular la pendiente de la recta n, para conocer el factor de endurecimiento, pero antes se deben conocer los valores de σ y ϵ verdaderos. Para hacer el cálculo tanto del esfuerzo como de la deformación verdaderos es necesario aplicar las siguientes fórmulas.

Tomando en cuenta que no se aplica a todos los valores de la curva, únicamente se utilizan los valores presentes en la zona plástica ya que la ley de Hollomon figura IV.14 es la que describe esta zona.

$$\sigma_{verdadera} = \sigma_{ingenieril} * (1 + \epsilon_{ingenieril}) \quad (12)$$

$$\epsilon_{verdadera} = \ln(1 + \epsilon_{ingenieril}) \quad (13)$$

Cuando se obtienen estos datos es necesario hacer un ajuste a los valores verdaderos, por lo tanto se debe calcular el Ln de cada uno de los datos para que obtengamos $\ln(\sigma)$ y $\ln(\epsilon)$ presentes en nuestra fórmula despejada.

Una vez que se tienen los datos se grafican posteriormente trazando una línea de tendencia y desplegando su ecuación. Para saber que tan alineadas están la línea de tendencia y la del gráfico es necesario visualizar el valor R^2 , entre más cercano sea a 1 mayor es la coincidencia entre ambas.

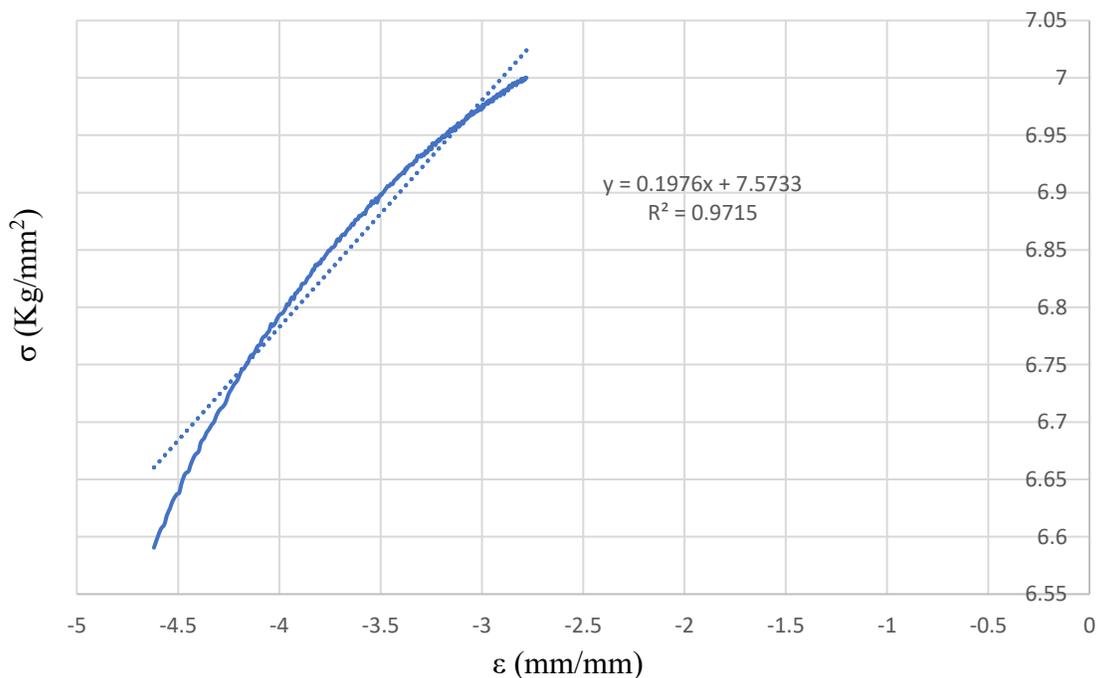


Figura IV.14 Ejemplo de la ampliación gráfica de la ley de Hollomon.

Como se puede observar en el ejemplo, al desplegar la fórmula de la recta es posible visualizar el valor de la pendiente (m) que para este caso representa a “n”, con un valor de 0.1949 redondeado a 0.19.

Para el cálculo de R (coeficiente de anisotropía plástica) es necesario realizar los siguientes cálculos.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (14)$$

Donde ϵ_w es la deformación en el ancho, ϵ_t es la deformación en el espesor. Para ello se deben realizar las siguientes operaciones.

$$\epsilon_w = \frac{w_{\text{ancho final}} - w_{\text{ancho inicial}}}{w_{\text{ancho inicial}}} \quad (15)$$

$$\epsilon_t = \frac{t_{\text{espesor final}} - t_{\text{espesor inicial}}}{t_{\text{espesor inicial}}} \quad (16)$$

Posteriormente los valores son sustituidos en la fórmula principal. Para un análisis mucho más profundo de la lámina de su comportamiento en distintas direcciones se procedió con el cálculo de R, el cual es el coeficiente de anisotropía presente en una lámina de acero.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{45} + R_{90}}{4} \quad (17)$$

En donde cada una de las R representa el coeficiente de anisotropía a cada una de las diferentes direcciones consideradas en el ensayo. Para usos prácticos de esta investigación se decidió compilar todos los datos obtenidos en la tabla IV.3 que refleja los resultados calculados y su sencilla comparación. A continuación, se describe un análisis de cada una de las propiedades mecánicas consideradas en esta investigación.

Tabla IV.3 Compilación de los datos obtenidos en cada una de las pruebas.

Propiedad	Probeta a 0°	Probeta a 45°	Probeta a 90°
YP (MPa)	727	709	726
E (GPa)	70073	73002	72525
TS (MPa)	1043	1010	1020
% Elongación	11.2	13.7	10.8
n	0.19	0.19	0.24
R	1.5	1.8	1.8
\bar{R}	1.5		

En los resultados obtenidos del YP tanto en las probetas 0° y 90° los resultados son muy similares, pero en la 45° es ligeramente inferior, lo que enmarca su susceptibilidad a la deformación a comparación de las otras direcciones, esto podría ser un indicio de la anisotropía existente en las propiedades de la lámina de acero.

Hablando de lo observado en los resultados del módulo de Young (E) es notable que tanto en la dirección 45° y 90° los valores superan a los resultados que se muestra en la dirección 0°, por lo tanto, la rigidez presente en las dos primeras direcciones mencionadas es superior. La rigidez presente tanto a 45° como a 90° puede deberse a la forma y distribución de los granos ofreciendo a su vez mayor resistencia a la deformación.

Esto es algo que también se puede observar en el coeficiente de anisotropía (R), donde los valores calculados para las direcciones 45° y 90° son los mismos mientras que en la dirección 0° es ligeramente inferior, corroborando que el comportamiento entre las direcciones 45° y 90° es muy similar, aunque no dista mucho de lo encontrado a 0°. Mientras que los resultados de los cálculos desarrollados para obtener el TS demuestran la alta resistencia del acero estudiado, coincidiendo con las propiedades mostradas con anterioridad, aunque el plano más resistente es indiscutiblemente a 0°, el cual alcanza un valor superior a los 1000 MPa.

Se puede distinguir que la prueba realizada a 45° presenta una ductilidad superior pero no tan resistente como el resto, a diferencia de la 90°, la cual presenta una resistencia alta, pero de

las tres es la que presenta una ductilidad más baja, por lo tanto, se puede inferir que el acero es más frágil en esta dirección, también se puede reflejar en su valor n , que es mucho mayor, es decir, aumenta la fragilidad.

En cambio, en la dirección de rolado (0°) el porcentaje de elongación es intermedio comparándolo con los otros dos, teniendo una muy buena ductilidad y alta resistencia. Si bien, revisando los resultados del coeficiente de anisotropía plástica, se puede observar que solo es constante en dos direcciones (45° y 90°) y en la dirección de rolado es ligeramente menor, el comportamiento de la lámina no es muy desigual a diferentes direcciones.

A diferencia de otros aceros como el HB ya antes mencionado en esta investigación que presenta características y usos similares al investigado, el DP1000 presenta una mezcla adecuada de ductilidad y resistencia que lo hacen apto para la conformación plástica, es decir, que con el acero DP1000 es posible fabricar piezas con geometrías complicadas e irregulares sin que esta sufra defectos como fracturas o pliegues que podrían modificar sus propiedades mecánicas, además de eso tiene una muy alta resistencia haciéndolo ideal para partes de seguridad en automóviles, que justamente requieren de una ductilidad y alta resistencia, es por eso que el acero DP1000 es ideal para estas aplicaciones.

Conclusiones

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo principal la caracterización de un acero DP1000 para uso automotriz, conocer sus propiedades mecánicas, y microestructura con la finalidad de inferir su comportamiento mecánico. Lo cual, pudo ser comprobado en los resultados de la experimentación.

El estudio realizado durante esta investigación ayuda a conocer y cuantificar las propiedades del acero DP1000 debido a su alta resistencia y ductilidad lo cual permite su uso en piezas que requieren de las propiedades ya mencionadas. Además, de que, hacer una caracterización permite conocer a fondo el comportamiento de un acero y poder compararlo con el de otros y de esta forma poder elegir el adecuado para el uso que se desea aplicar.

En adición fue posible inferir las propiedades mecánicas del acero DP1000 conociendo y analizando su microestructura, es decir, se corroboró la estrecha relación existente entre ambos, ya que, las islas de martensita ofrecen alta dureza haciendo que el acero sea frágil y se contrarresta con matriz de ferrita que le proporciona ductilidad al acero, es así, cómo es posible obtener un acero avanzado, el cual está diseñado para resistir altas cargas de tracción y es utilizado en piezas de seguridad para automóviles.

Una de las mayores complicaciones al hacer esta investigación, fueron los reactivos de ataque, ya que tenían que ser precisos y tomó un poco más de tiempo del esperado, pero que, al final, pudo llevarse a cabo sin mayor conflicto.

La caracterización es una parte importante de la investigación, de esta manera es posible conocer a más profundidad el material con el que se está trabajando, además de que ayuda a su divulgación y que exista un mayor conocimiento sobre el comportamiento sobre este tipo de materiales avanzados.

Bibliografía

- ASTM. (s.f.). *ASTM-E8-E8M-16a*. Estados Unidos: ASTM. Recuperado el 07 de 01 de 2025
- Chengwu Zheng, D. R. (30 de Mayo de 2013). Interaction between recrystallization and phase transformation during intercritical annealing in a cold-rolled dual-phase steel: A cellular automaton model. *Acta Materialia*, 5504-5506. Recuperado el 1 de Octubre de 2024, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645413004187?via%3Dihub>
- Cosa Steel. (20 de 01 de 2022). *¿Qué aceros se utilizan en los automóviles?* Recuperado el 23 de 11 de 2024, de <https://es.cosasteel.com/what-steels-are-used-in-cars/>
- FasterCapital. (1 de 06 de 2024). *FasterCapital*. Recuperado el 30 de 12 de 2024, de Endurecimiento por deformacion Rompiendo limites el fenomeno del endurecimiento por deformacion: <https://fastercapital.com/es/contenido/Endurecimiento-por-deformacion--Rompiendo-limites--el-fenomeno-del-endurecimiento-por-deformacion.html>
- Gold Supplier.com. (06 de 06 de 2024). *Gold Supplier.com*. Recuperado el 16 de 01 de 2025, de Comprensión de la fractura dúctil y frágil: diferencias clave y comportamiento del material: <https://blog.goldsupplier.com/es/ductility-vs-brittleness/>
- Granbom, Y. (2010). *Royal Institute of Technology*. Obtenido de Royal Institute of Technology: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:353680/FULLTEXT10.pdf>
- Gunt Gerätebau GmbH. (s.f.). *Metodos de ensayo mecánicos*. Recuperado el 18 de 12 de 2024, de Metodos de ensayo mecánicos: https://gunt.de/images/download/mechanical_testing_methods_spanish.pdf
- Hobart Filler Metals. (2024). *What is Tensile Testing and Why is it Important?* Recuperado el 29 de 11 de 2024, de What is Tensile Testing and Why is it Important?: <https://www.hobartbrothers.com/resources/technical-articles/what-is-tensile-testing-and-why-is-it-important/>
- Ibertest. (s.f.). Soluciones de ensayo para materiales metálicos. *Ibertest Advanced Test Solutions*, 14. Recuperado el 08 de 01 de 2025, de <https://www.ibertest.es/wp->

- content/uploads/docs/fichas_producto/soluciones_ensayo/IBERTEST-Soluciones_de_ensayo_para_materiales_met%C3%A1licos.pdf?utm
- Jesús Setién Marquínez, J. A. (s.f.). *unican.es*. Recuperado el 20 de 12 de 2024, de Materiales-G704/G742 Lección 2. Ley de Hooke: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2225/course/section/2110/leccion_02.pdf
- José Luis Arana Bilbao, J. J. (s.f.). *Mecánica de Fractura*. Zarautz: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Recuperado el 03 de 01 de 2025, de https://www.academia.edu/116809272/Mec%C3%A1nica_de_fractura
- Keyence. (s.f.). *Keyence*. Recuperado el 03 de 01 de 2025, de Análisis de fallas metalúrgicas y patrones de fractura: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/vhx-casestudy/automobile/fracture-surface.jsp>
- Mandhyan, A. K. (2014). Corrosion of metals and its prevention. En A. K. Mandhyan, *Corrosion of metals and its prevention* (págs. 19-20). National Metallurgical Laboratory. Recuperado el 24 de 10 de 2024, de <https://core.ac.uk/download/pdf/297711311.pdf>
- National Material Company. (23 de Marzo de 2018). *National Material Company*. Recuperado el 15 de Agosto de 2024, de Dual-Phase Steels: An Introduction: <https://www.nationalmaterial.com/introduction-dual-phase-steels/>
- Nde-ed. (s.f.). *Iowa state university*. Recuperado el 09 de 01 de 2025, de Primary Metallic Crystalline Structures: https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Structure/metallc_structures.xhtml
- Posco. (2022). *Posco Products*. Recuperado el 14 de Agosto de 2024, de Posco Products: <http://product.posco.com/homepage/product/eng/jsp/process/s91p2000410c.jsp>
- Rodolfo Rodríguez Baracaldo, J. M. (2016). Influencia del proceso de revenido en el comportamiento mecánico de un acero de fase dual de uso industrial automotriz. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(1), 94-101. Recuperado el 17 de 09 de 2024
- Rodríguez, Y. (26 de 04 de 2014). *Slideshare*. Recuperado el 18 de 12 de 2024, de Esfuerzo y Deformación: https://es.slideshare.net/slideshow/esfuerzo-y-deformacion-33984306/33984306?utm_source=chatgpt.com

- Salazar, I. L. (03 de 2013). Breve resumen sobre los conceptos más importantes. *Pitra, Boletín Técnico*, 2. Recuperado el 22 de 01 de 2025, de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/332/39.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Struers. (2024). *Preparación metalográfica de recubrimientos de zinc*. Recuperado el 29 de 10 de 2024, de Preparación metalográfica de recubrimientos de zinc: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Zinc-coatings#>
- Total Materia. (Septiembre de 2020). *Total Materia*. Recuperado el 5 de Septiembre de 2024, de <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/dual-phase-steel/>
- World Auto Steel. (18 de 08 de 2014). *AZO Materials*. Recuperado el 22 de 10 de 2024, de Properties of Dual Phase (DP) Steel: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11245>
- Zwick Roell. (s.f.). *Zwick Roell*. Recuperado el 15 de 01 de 2025, de Mecánica de la fractura (MFEL, MFEP): <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/mecanica-de-la-fractura/>
- Zwick Roell. (s.f.). *Zwick Roell*. Recuperado el 15 de 01 de 2025, de Mecánica de la fractura (MFEL, MFEP): <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/mecanica-de-la-fractura/>