



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ESCUELA SUPERIOR DE CIUDAD SAHAGÚN

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA



Tesis

“Evaluación de las propiedades mecánicas de aceros TRIP obtenidos por recocido intercrítico con aplicaciones automotrices”

Que para obtener el título de

Licenciado en Ingeniería Mecánica

Presenta

Francisco Cruz Tamez

Asesor:

Dr. José Sergio Pacheco Cedeño

Co-Asesor:

Dr. Martín Ortiz Domínguez

Cd. Sahagún, Hgo., octubre 2022



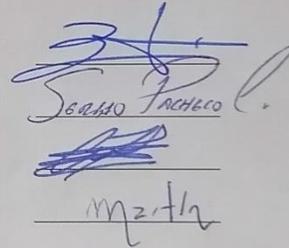
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Escuela Superior de Ciudad Sahagún
Campus Sahagún

P.D.L.I.M. FRANCISCO CRUZ TAMEZ
P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que el Jurado que le fue asignado a su trabajo de titulación denominado **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS TRIP OBTENIDOS POR RECOCIDO INTERCRÍTICO CON APLICACIONES AUTOMOTRICES”**, y que después de revisarlo han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

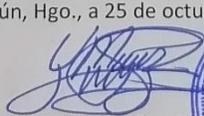
PRESIDENTE	Dr. Jorge Zuno Silva
VOCAL	Dr. José Sergio Pacheco Cedeño
SECRETARIO	Dr. Carlos Ernesto Borja Soto
SUPLENTE	Dr. Martín Ortiz Domínguez



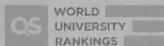
Handwritten signatures of the jury members: Dr. Jorge Zuno Silva, Dr. José Sergio Pacheco Cedeño, Dr. Carlos Ernesto Borja Soto, and Dr. Martín Ortiz Domínguez.

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
Cd. Sahagún, Hgo., a 25 de octubre de 2022



M. en C. Yira Muñoz Sánchez
Coordinadora de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica



Carretera Ciudad Sahagún-Otumba s/n,
Zona industrial Ciudad Sahagún, Tepeapulco,
Hidalgo, C.P. 43990
Teléfono: 771 71 720 00 ext 5300
jorge_zuno@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Al ver el resultado logrado con este trabajo, lo único que puedo decir es ¡Gracias!
El trabajo realizado fue posible gracias al apoyo de mi familia, quienes han estado a mi lado en todo momento.

Agradezco a la Escuela Superior de Ciudad Sahagún y a todos mis profesores por enseñarme todo lo que sé y por guiarme para ser una mejor persona.

Agradezco a mi asesor el Dr. José Sergio Pacheco Cedeño por su apoyo y entusiasmo en la elaboración de la tesis, por sus aportaciones y sus consejos.

Agradezco al Dr. Jorge Zuno Silva por permitir trabajar en el laboratorio de análisis de fractura.

Agradezco al Dr. Carlos Ernesto Borja Soto por las observaciones realizadas para mejorar la calidad de la tesis.

Gracias, también, a la M. en C. Yira Muñoz Sánchez por el apoyo brindado en el trámite de titulación.

Y, por supuesto, gracias a todos mis compañeros que siempre nos mantuvimos unidos, haciendo de todo este tiempo un momento agradable.

Resumen

En el presente trabajo se estudia el efecto de la composición química utilizada en la fabricación de tres aceros TRIP, los cuales fueron sometidos a diferentes ensayos (tensión, impacto y dureza) para observar el comportamiento de su microestructura y analizar sus propiedades mecánicas.

El tratamiento térmico utilizado en las muestras de la probeta consistió en un recocido intercrítico que es donde se forma la ferrita y la austenita, después pasa por un proceso isotérmico donde se mantiene la ferrita y se transforma la austenita en bainita volviéndose metaestable a temperatura ambiente, por último, se enfría a temperatura ambiente para obtener la austenita retenida antes de su transformación en martensita.

La probeta cuenta con tres muestras de acero TRIP la cuales se lijaron y pulieron hasta obtener un acabado espejo para obtener las imágenes de su microestructura con ayuda de un microscopio óptico y caracterizar su microestructura obteniendo ferrita, bainita y austenita retenida.

Los resultados de los ensayos de tensión, impacto y dureza muestran que las propiedades de las muestras corresponden a las de un acero TRIP el cual puede ser utilizado para la fabricación de componentes en la industria automotriz.

Palabras clave: acero TRIP, recocido intercrítico, ferrita, bainita, austenita, austenita retenida, martensita, microestructura.

Abstract

In the present work, the effect of the chemical composition used in the manufacture of three TRIP steels is studied, which were subjected to different tests (tension, impact and hardness) to observe the behavior of their microstructure and analyze their mechanical properties.

The thermal treatment used in the samples of the test tube consisted of an intercritical annealing, which is where the ferrite and austenite are formed, then it goes through an isothermal process where the ferrite is maintained and the austenite is transformed into bainite, becoming metastable at room temperature. finally, it is cooled to room temperature to obtain the retained austenite before its transformation into martensite.

The specimen has three samples of TRIP steel which were sanded and polished to a mirror finish to obtain images of their microstructure with the help of an optical microscope and characterize their microstructure obtaining ferrite, bainite and retained austenite.

The results of the stress, impact and hardness tests show that the properties of the samples correspond to those of a TRIP steel which can be used for the manufacture of components in the automotive industry.

Key words: TRIP steel, intercritical annealing, ferrite, bainite, austenite, retained austenite, martensite, microstructure.

Índice

Introducción	1
Antecedentes	2
Problemática	4
Solución propuesta	5
Justificación	7
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
Aportaciones	9
Alcance	9
Limitaciones	9
Capítulo 1: Base teórica	10
Aceros AHSS	10
Clasificación de los aceros TRIP	13
Aceros Doble Fase (DP)	14
Aceros TRIP (Transformación inducida por plasticidad)	16
Aceros de fase compleja (CP)	18
Aceros ferrítico - bainítico (FB)	20
Aceros TWIP (Plasticidad inducida por maclaje)	23
Aceros martensíticos (MS)	25
Tratamientos termomecánicos usados para la obtención de un acero TRIP	27
Conformado de los aceros AHSS	30
Aceros TRIP	32
Mecanismos de deformación de la austenita retenida en un acero TRIP	34
Composición química de los aceros TRIP	37
Impacto microestructural y propiedades químicas del acero TRIP	38

Pruebas de impacto	39
Difracción de rayos X (DRX)	42
Capítulo 2: Procedimiento experimental	43
Recepción de probetas para ensayos de tensión e impacto	43
Caracterización microestructural de las probetas (M.O. y DRX)	44
Microscopio Óptico	45
Difracción de rayos x (DRX)	46
Ensayo de tensión	47
Ensayo de impacto	48
Ensayo de dureza	49
Capítulo 3: Análisis de resultados	50
Caracterización microestructural de las probetas (M.O. y DRX)	51
Microscopía óptica	51
Difracción de rayos x (DRX)	54
Ensayos de tensión e impacto	58
Ensayos de dureza	61
Conclusiones	63
Referencias	64
Anexos	67
Anexo 1: Ensayo de tracción bajo la Norma ASTM E8	67

Índice de figuras

Figura 1. Evolución de la aplicación de los aceros avanzados utilizados en la carrocería del Volvo CX90 en a) 2001 y b) 2015 (CZ, 2022)	3
Figura 2. Principales zonas de gestión de colisiones de un auto (M. Tamarelli, 2011)	5
Figura 3. Diagrama global de conformabilidad (2021) comparando la resistencia y el alargamiento de los grados actuales y emergentes (WorldAutoSteel, 2022)	10
Figura 4. Curva esfuerzo-deformación ingenieril para una serie de aceros DP con un espesor: DP 250/450 y DP 500/800 = 1 mm (WorldAutoSteel, 2022)	14
Figura 5. Microestructura de un acero doble fase (DP) (WorldAutoSteel, 2022)	15
Figura 6. Micrografía de un acero doble fase (DP) (WorldAutoSteel, 2022)	15
Figura 7. Microestructura típica de un acero TRIP (M. Tamarelli, 2011)	16
Figura 8. Micrografía de un acero TRIP (WorldAutoSteel, 2022)	16
Figura 9. Curva esfuerzo-deformación ingenieril de un acero TRIP 350/600 con una elongación mayor que un acero DP 350/600 y un acero HSLA 350/450 (WorldAutoSteel, 2022)	17
Figura 10. Esquema de una microestructura de acero de fase compleja que muestra martensita y austenita retenida en un matiz de ferrita-bainita (WorldAutoSteel, 2022)	18
Figura 11. Micrografía de un acero de fase compleja (CP), HR800Y980T-CP (WorldAutoSteel, 2022)	19
Figura 12. Comparación de curva esfuerzo-deformación de aceros HSLA 350/450 y CP 1000/1200 (WorldAutoSteel, 2022)	20
Figura 13. Microestructura de un acero ferrítico-bainítico FB (WorldAutoSteel, 2022)	21
Figura 14. Micrografía de un acero ferrítico-bainítico (FB), HR400Y540T-FB (WorldAutoSteel, 2022)	21

Figura 15. Comparación de curva esfuerzo-deformación para aceros HSLA 350/450 y FB 450/600 (WorldAutoSteel, 2022)	<u>22</u>
Figura 16. Microestructura de un acero TWIP (WorldAutoSteel, 2022)	<u>23</u>
Figura 17. Acero TWIP recocido (izquierda) y después de la deformación (derecha) que muestra marcas de deformación. El número de maclajes de deformación aumenta con el incremento de tensión (WorldAutoSteel, 2022)	<u>23</u>
Figura 18. Curva esfuerzo-deformación de diferentes aceros TWIP (WorldAutoSteel, 2022)	<u>24</u>
Figura 19. Microestructura de un acero martensítico (MS) (WorldAutoSteel, 2022)	<u>25</u>
Figura 20. Micrografía de un acero martensítico (MS) 950/1200 (WorldAutoSteel, 2022)	<u>25</u>
Figura 21. Curva esfuerzo-deformación de una serie de aceros MS con un espesor de 1.8 mm a 2 mm (WorldAutoSteel, 2022)	<u>26</u>
Figura 22. Representación esquemática del tratamiento termomecánico aplicado para laminado en caliente o frío en aceros TRIP multifase (γ : austenita, α : ferrita, α^A : martensita, α_b : bainita) (P. J., 2004)	<u>27</u>
Figura 23. Esquema de procesamiento y evolución estructural durante el tratamiento térmico en un acero TRIP (Del Castillo Rodríguez, 2009)	<u>28</u>
Figura 24. Regímenes asistidos por tensión e inducidos por deformación de transformación martensítica inducida mecánicamente (P., L., Y., K., & J., 2012)	<u>30</u>
Figura 25. Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) (M. Tamarelli, 2011)	<u>31</u>
Figura 26. Acero TRIP 350/600 con mayor alargamiento total que un acero DP 360/600 y HSLA 350/450 (WorldAutoSteel, 2022)	<u>32</u>
Figura 27. Fenómeno TRIP: los círculos negros designan los puntos donde la austenita se ha transformado en martensita (Fonstein, 2015)	<u>33</u>
Figura 28. Mecanismos dominantes de deformación en diferentes rangos de temperatura en un grano de austenita retenida en acero TRIP: (a) formación de	

martensita atérmica, (b) plasticidad inducida por la tensión, (c) plasticidad inducida por la deformación, y (d) deslizamiento de dislocaciones con formación de micromaclas. Además, (c) muestra el estado de tensión triaxial de un elemento de volumen sometido a una transformación de fase martensítica durante un ensayo de tensión (P., L., Y., K., & J., 2012)	<u>35</u>
Figura 29. Energía dinámica absorbida en función de la resistencia a tensión para aceros doble fase, TRIP, bainíticos, con bajo contenido de carbono y acero estructural (P., L., Y., K., & J., 2012)	<u>36</u>
Figura 30. Ensayo Charpy en (a) se observa la muesca de la muestra y en (b) la máquina de impacto pendular (J. McEvily, 2013)	<u>40</u>
Figura 31. Geometría y dimensiones de los tipos de probetas Charpy (ASTM International, 2000)	<u>41</u>
Figura 32. Diagrama de flujo de las etapas del proceso experimental	<u>43</u>
Figura 33. a) Pieza montada en baquelita, b) Montadora de probetas en baquelita	<u>44</u>
Figura 34. Microscopio óptico Nikon	<u>45</u>
Figura 35. a) Equipo de difracción de rayos x marca Bruker y b) difractómetro	<u>46</u>
Figura 36. Máquina de ensayos de tensión	<u>47</u>
Figura 37. Máquina para ensayos de impacto Charpy	<u>48</u>
Figura 38. Zonas del ensayo de dureza a) Sección normal, b) Sección transversal (ASTM International, 2013)	<u>49</u>
Figura 39. Durómetro HOYTOM	<u>49</u>
Figura 40. Lote de probetas de aceros TRIP recibidas	<u>50</u>
Figura 41. Muestra de acero TRIP (vista superior imagen izquierda y vista inferior imagen derecha)	<u>51</u>
Figura 42. Pulido de muestra de acero TRIP para obtener acabado espejo	<u>51</u>
Figura 43. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita (αb) y austenita (γ) en la muestra 00	<u>52</u>

Figura 44. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita (αb) y austenita (γ) en la muestra 02	53
Figura 45. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita (αb) y austenita (γ) en la muestra 04	54
Figura 46. Difractograma de rayos x de la muestra 00	55
Figura 47. Difractograma de rayos x de la muestra 02	56
Figura 48. Difractograma de rayos x de la muestra 04	56
Figura 49. Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril obtenida del ensayo de tensión	58
Figura 50. Gráfica de energía de impacto en el acero	59
Figura 51. Zona de fractura de los tres aceros TRIP a) CQ-00, b) CQ-02 y c) CQ-04	60
Figura 52. Ensayo de dureza superficial a) zona normal, b) zona transversal de las muestras	61
Figura 53. Resultados de los ensayos de dureza (HRC, Rockwell C) en las tres muestras de aceros TRIP	62
Figura 54. Probetas para el ensayo de tracción uniaxial de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M unidades en mm (ASTM International, 2013)	67

Índice de tablas

Tabla 1. Requerimientos para la selección del material (M. Tamarelli, 2011)	6
Tabla 2. Nomenclatura de aceros (WorldAutoSteel, 2022)	11
Tabla 3. Sintaxis relacionada con los niveles de fuerza de los aceros AHSS (WorldAutoSteel, 2022)	12
Tabla 4. Composición química del acero estudiado (% peso)	50

Introducción

En la actualidad la industria siderúrgica se encuentra trabajando en el desarrollo de nuevos aceros buscando mejorar sus propiedades mecánicas para obtener una mayor resistencia y conformabilidad para la manufactura de componentes automotrices.

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés Advanced High Strength Steels) gracias a sus propiedades cada vez son más empleados en la industria automotriz, aún se siguen realizando estudios de investigación para el desarrollo de aleaciones más eficientes que ser aplicadas en más componentes que conforman la estructura de los vehículos.

En el presente trabajo de investigación se caracterizaron mediante microscopía óptica y se evaluaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de tensión y dureza de tres aceros TRIP con diferente composición química CQ-00 (0.199%C, 0.97%Si, 1.2%Mn y 0.52%Al), CQ-02 (0.214%C, 0.73%Si, 1.57%Mn y 0.74%Al) y CQ-04 (0.202%C, 0.47%Si, 1.69%Mn y 1.00%Al).

Antecedentes

La primera carrocería para automóvil se fabricó en 1934 en Francia, desde entonces la industria automotriz ha estado en constante cambio y uno de sus principales cambios ha sido el uso de diferentes tipos de acero con las que se fabrican los componentes estructurales de los autos.

Los fabricantes de automóviles buscan hacer autos más ligeros e incrementar la seguridad de los pasajeros, para lograrlo se ha reducido el espesor de la carrocería reduciendo así su peso, sin embargo, al hacerlo se necesitan materiales más resistentes y fáciles de conformar, para fabricar las diferentes piezas de la carrocería y que éstas resistan los esfuerzos estáticos, dinámicos y de impacto que se producen durante una colisión.

La evolución de los aceros utilizados para fabricar partes de la carrocería de los automóviles ha sido constante en un inicio la resistencia mecánica no llegaba a los 200 MPa, hoy en día se han desarrollado aceros que alcanzan una resistencia cercana a los 2000 MPa, uno de los avances más importantes es el uso de aceros de ultra alta resistencia, los cuales se comenzaron a utilizar en algunas piezas de la estructura obteniendo buenos resultados por lo que con el tiempo se han incorporado más diseños de piezas fabricadas con aceros AHSS en la carrocería (WorldAutoSteel, 2022).

En la figura 1 se muestra la evolución de los tipos de acero utilizados en la carrocería de los automóviles tomando como ejemplo el Volvo XC90, en su primera generación de camionetas en el 2001 aproximadamente el 7% de la carrocería fue fabricada de acero de ultra alta resistencia, sin embargo, en el 2015 su segunda generación el uso de acero de ultra alta resistencia representa casi el 40% del peso de la carrocería.

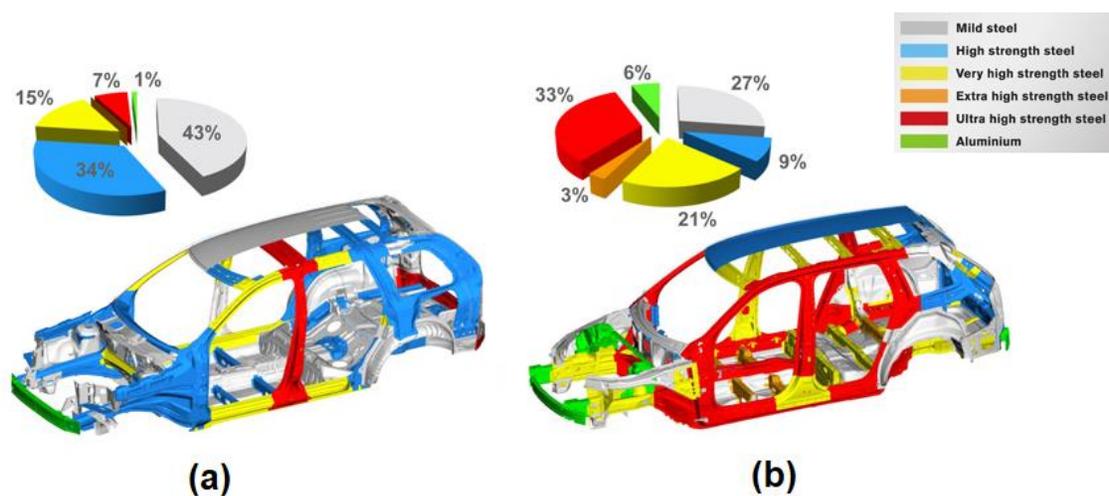


Figura 1. Evolución de la aplicación de los aceros avanzados utilizados en la carrocería del Volvo CX90 en a) 2001 y b) 2015 (CZ, 2022)

Problemática

En la actualidad para los fabricantes de autos el mayor desafío es mejorar la seguridad y el ahorro de combustible de los autos, por lo que, se encuentran buscando nuevos materiales que cumplan con los estándares más exigentes. Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) cumplen con los requisitos de seguridad, eficiencia, reducción de emisiones, capacidad de fabricación, durabilidad y calidad a un bajo costo.

Los aceros AHSS son una nueva generación de grados de acero que proporcionan una resistencia extremadamente alta y mantienen la alta conformabilidad requerida para la fabricación de componentes. Estos aceros se encuentran constantemente en investigación y desarrollo con la finalidad de ampliar sus aplicaciones dentro de la industria automotriz, la mayoría de estos aceros tiene composiciones químicas cuidadosamente seleccionadas y microestructuras multifásicas que resultan de procesos controlados de calentamiento y enfriamiento logrando propiedades mecánicas como resistencia, ductilidad, tenacidad y fatiga (WorldAutoSteel, 2022).

Solución propuesta

Para comprender mejor las propiedades y ampliar el rango de aplicación de los aceros AHSS, es importante hacer investigaciones que ayuden a mejorar las tecnologías necesarias para la fabricación de piezas con AHSS con la finalidad de crear vehículos más seguros sin afectar el medio ambiente.

Los aceros AHSS cumplen con los requerimientos de los fabricantes de autos ya que mejoran la seguridad, la eficiencia en el uso de combustible, se tiene menor impacto ambiental, su capacidad de fabricación es excelente al igual que su durabilidad y costo.

Para cumplir con los requerimientos es necesario analizar los distintos requisitos de seguridad, ya que el compartimiento del pasajero se cierra dentro de una jaula de "seguridad" rígida, diseñada para proteger a los pasajeros en caso de un choque a baja o alta velocidad, la estructura debe ser capaz de evitar cualquier deformación que comprometa la integridad de la estructura y afecte el espacio alrededor de los pasajeros.

En la figura 2 se muestran las zonas de deformación ubicadas en la parte delantera y trasera del auto, las cuales están diseñadas para absorber la mayor cantidad de energía posible en caso de una colisión frontal o trasera, al absorber la energía a lo largo de la distancia, la zona de deformación amortigua el impacto y ayudará a preservar la estructura del compartimiento de pasajeros.



Figura 2. Principales zonas de gestión de colisiones de un auto (M. Tamarelli, 2011)

Para la selección de los materiales en la estructura de un automóvil, se consideran tanto la zona de deformación como el comportamiento del material, en la tabla 1 se muestran estos aspectos.

Tabla 1. Requerimientos para la selección del material (M. Tamarelli, 2011)

Zona de deformación:	
Requerimientos de desempeño:	Absorción de energía a distancia en caso de colisión.
Propiedades del material:	Alto endurecimiento por deformación, resistencia y ductilidad.
Evidencia de esta propiedad:	Gran área bajo la curva esfuerzo-deformación.
Selección potencial del acero:	Aceros AHSS (DP, CP o TRIP)

Compartimiento del pasajero:	
Requerimientos de desempeño:	Que no sufra deformación durante un choque.
Propiedades del material:	Alto límite elástico.
Evidencia de esta propiedad:	Alta resistencia a la tracción.
Selección potencial del acero:	Aceros AHSS (>980 MPa)

Es importante tener una buena elección de propiedades del acero para que los componentes que forman la estructura cumplan con los requisitos principalmente los que debe cumplir en caso de una colisión y los establecidos por las compañías automotrices.

Justificación

La industria automotriz se encuentra en constante cambio, buscando materiales que permitan reducir el peso de los vehículos, reducir la emisión de gases y que cumplan con los nuevos reglamentos de seguridad para los pasajeros a un bajo costo.

La necesidad de contar con materiales más resistentes y ligeros ha llevado al desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) ya que estos cumplen con los requisitos, sin embargo, son materiales que aún se encuentran en investigación y desarrollo, por lo que esta investigación permitirá tener una visión más clara sobre el comportamiento de los aceros TRIP bajo ensayos de tensión analizando los cambios en su microestructura cuando es sometida a deformación.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar las propiedades mecánicas de tres aceros TRIP obtenidos por recocido intercrítico mediante ensayos de tensión, impacto y dureza para determinar la influencia de la composición química en su comportamiento mecánico.

Objetivos Específicos

- Identificar las fases presentes en los tres aceros antes del tratamiento térmico mediante microscopía óptica.
- Obtener la curva esfuerzo-deformación ingenieril de los tres aceros TRIP mediante ensayos de tensión a temperatura ambiente.
- Obtener la energía de absorción de los tres aceros TRIP mediante ensayos de impacto Charpy a temperatura ambiente.
- Determinar la resistencia a la penetración de los tres aceros antes y después del tratamiento térmico mediante ensayos de dureza.
- Caracterizar la microestructura de las probetas mediante microscopía óptica y MEB antes y después del tratamiento térmico.

-

Aportaciones

La principal aportación de este trabajo es estudiar el comportamiento microestructural de tres aceros avanzados de alta resistencia TRIP, así como determinar si la absorción de energía corresponde a la de un acero TRIP y puede ser de utilidad para la fabricación de piezas en la industria automotriz.

Alcance

El proyecto tiene como alcance realizar los ensayos de tensión, impacto y dureza de los tres aceros TRIP estudiados, analizar los resultados obtenidos y determinar si sus propiedades corresponden a las de un acero TRIP.

Limitaciones

Nuestro trabajo se limita al estudio a tres aceros TRIP obtenidos por recocido intercrítico con diferente composición química CQ-00 (0.199%C, 0.97%Si, 1.2%Mn y 0.52%Al), CQ-02 (0.214%C, 0.73%Si, 1.57%Mn y 0.74%Al) y CQ-04 (0.202%C, 0.47%Si, 1.69%Mn y 1.00%Al) así como, el análisis de su comportamiento microestructural después de realizar los ensayos de tensión, impacto y dureza.

Capítulo 1: Base teórica

Aceros AHSS

Los aceros AHSS tienen una microestructura formada de diferentes fases, las cuales pueden cambiar dependiendo del tipo de AHSS con el que se esté trabajando. La microestructura de aceros AHSS puede estar conformada por dos o más de las siguientes fases: ferrita, martensita, bainita y austenita retenida, donde la combinación de estas produce propiedades mecánicas únicas.

Algunos aceros tienen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío, permitiendo aumentar la resistencia mecánica sin reducir su conformabilidad (WorldAutoSteel, 2022). En la figura 3 se muestra la clasificación de los aceros usados en la industria automotriz, incluyendo aceros de menor resistencia (aceros suaves y libres de intersticios); aceros convencionales de alta resistencia, tales como aceros microaleados (AHSLA) y alta resistencia endurecibles en horno (HB); y aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), así como, los aceros de transformación inducida por plasticidad (TRIP) y doble fase (DP).

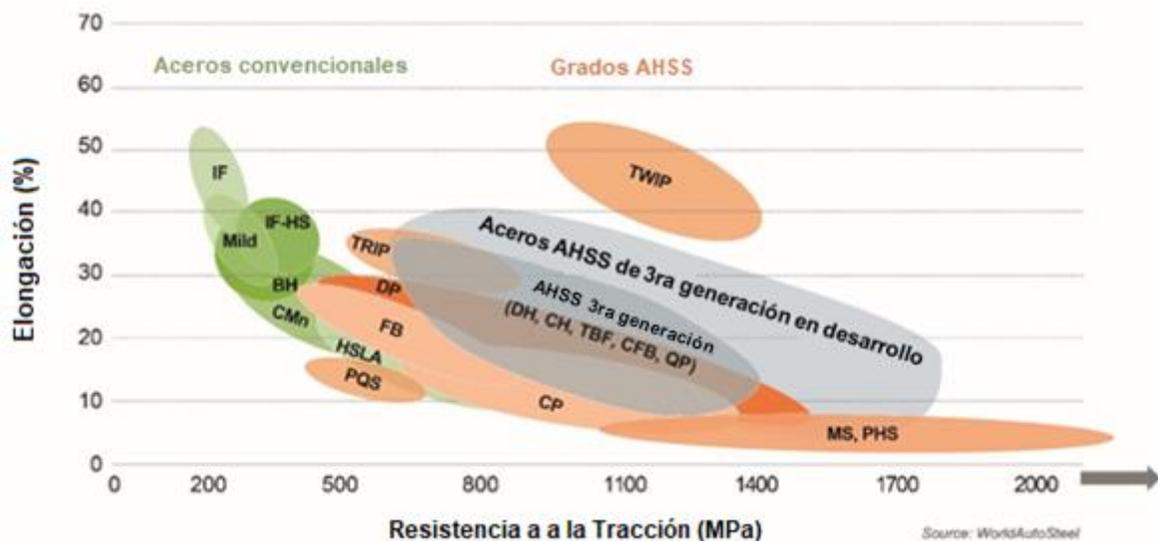


Figura 3. Diagrama global de conformabilidad (2021) comparando la resistencia y el alargamiento de los grados actuales y emergentes (WorldAutoSteel, 2022)

En la tabla 2 se muestra la nomenclatura de los aceros AHSS que aparecen en la figura 3.

Tabla 2. Nomenclatura de aceros (*WorldAutoSteel, 2022*)

Iniciales	Tipo de acero	Iniciales	Tipo de acero
IF	Libre Intersticial	CFB	Bainita Sin Carburos
IF-HS	Libre Intersticial - Alta Resistencia	TBF	TRIP - Ferrita Bainítica Asistida
CMn	Carbono - Manganeso	TRIP	Transformación Inducida por Plasticidad
BH	Endurecibles por Horneado	QP	Temple y Partición
LA	Alta Resistencia, Baja Aleación	TWIP	Plasticidad Inducida por Maclaje
DP	Doble Fase	Med-Mn	Medio - Manganeso
DH	Doble Fase - Alta Ductilidad	RA	Austenita retenida (abarca TRIP, QP, TW, med Mn y otros)
CP	Fase Compleja	MS	Martensítico
CH	Fase Compleja - Alta Ductilidad	PQS	Acero Templado por Presión
FB	Ferrítico - Bainítico	PHS	Acero Endurecido por Presión

La principal diferencia entre los aceros HSLA convencionales y los AHSS es su microestructura, los aceros HSLA convencionales son aceros ferríticos monofásicos con potencial para algo de perlita, mientras que los aceros AHSS son principalmente aceros con una microestructura multifásica, es decir, que contiene una o más fases distintas de ferrita, perlita o cementita, por ejemplo, martensita, bainita, austenita y/o austenita retenida. Algunos tipos de AHSS tienen mayor capacidad de endurecimiento por deformación, lo que da como resultado un equilibrio entre resistencia y ductilidad superior al de los aceros convencionales. Otros tipos de aceros tienen una resistencia a la tracción y un rendimiento ultra altos y muestran un comportamiento de endurecimiento por horneado.

Los aceros AHSS incluyen todos los aceros martensíticos y multifásicos que tienen una resistencia a la tracción mínima de 440 MPa, los aceros con una resistencia a la tracción muy alta (>1200 MPa), a veces se denominan aceros de ultra alta resistencia (UHSS).

Varias empresas eligen 980 MPa como inicio de los aceros de ultra alta resistencia mientras que otras utilizan valores más altos que pueden ir de 1180 MPa o 1270 MPa. Los aceros AHSS de tercera generación, se basan en los aceros AHSS de

primera generación (DP, TRIP, CP, MS y PHS) y segunda generación (TWIP) y son aceros multifásicos diseñados para tener una conformabilidad mejorada la cual es medida en pruebas de tracción y flexión, por lo general estos aceros se basan en la austenita retenida en un matiz de bainita o martensita y una porción de ferrita, todo en proporciones específicas para poder desarrollar propiedades mejoradas.

Los aceros TRIP son aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) utilizados principalmente en la industria automotriz, estos se caracterizan por su resistencia a la tracción de 500 – 1200 MPa y su elongación que se encuentra entre el 15 – 40%, en la tabla 3 se muestran los niveles de fuerza de distintos tipos de acero AHSS, su microestructura se constituye de ferrita, martensita, bainita y austenita retenida la cual produce propiedades mecánicas únicas en el material (WorldAutoSteel, 2022).

Tabla 3. Sintaxis relacionada con los niveles de fuerza de los aceros AHSS (WorldAutoSteel, 2022)

Fuerza expresada en kg/mm^2	Fuerza redondeada al 10 MPa más cercano	Fuerza redondeada al 50 MPa más cercano	Fuerza aproximada en ksi (1000 psi)	Ejemplos de clasificaciones
45	440	450	65	DP440 - DP450
50	490	500	70	DP490 - DP500
60	590	600	85	DP590 - DP600
70	690	700	100	TRIP690 - TRIP900
80	780	800	115	TRIP780 - TRIP800
100	980	1000	145	DH980 - DH1000
120	1180	1200	170	MS1180 - MS1200
150	1470	1500	215	PH1470 - PH1500

Las primeras investigaciones de aceros TRIP fueron realizadas por Zackay en 1967 (V. F., E. R., & D., 1967), reportando mejoras en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico, el cual presentaba transformación martensítica inducida por deformación de la austenita, sin embargo, este tipo de aceros tenían un elevado costo de producción.

En 1980, Matsumura (O., Y., & H., 1987) reportó el efecto TRIP en aceros con una composición química de 0.2% C, 1-2% Mn y 1–2% Si, llegando a la conclusión de que el porcentaje óptimo de austenita retenida debe estar entre el 5–20% para obtener un acero con mejoras en su resistencia y ductilidad.

Clasificación de los aceros TRIP

Los aceros TRIP al ser aceros complejos en comparación con los convencionales ya que su fabricación se basa en el control de porcentajes de su microestructura, tienen una resistencia y conformabilidad mejoradas que se logran mediante procesos de enfriamiento controlado.

La primera generación de aceros AHSS se clasifican en (WorldAutoSteel, 2022):

- Doble fase (DP)
- Transformación inducida por plasticidad (TRIP)
- Fase compleja (CP)
- Ferrítico-Bainítico (FB)
- Plasticidad inducida por maclaje (TWIP)
- Martensítico (MS)

Aceros Doble Fase (DP)

Los aceros doble fase (DP) se componen microestructuralmente de ferrita blanda y pequeñas islas de martensita duras, que alcanza una resistencia máxima a la tracción de 450 a 1050 MPa con un alargamiento del 5 y 25 %, la combinación de fases duras y blandas da como resultado un excelente equilibrio entre la fuerza y la ductilidad, y la resistencia aumenta a medida que aumenta la cantidad de martensita.

En la figura 4 se muestra el comparativo del comportamiento mecánico de diferentes grados de acero DP.

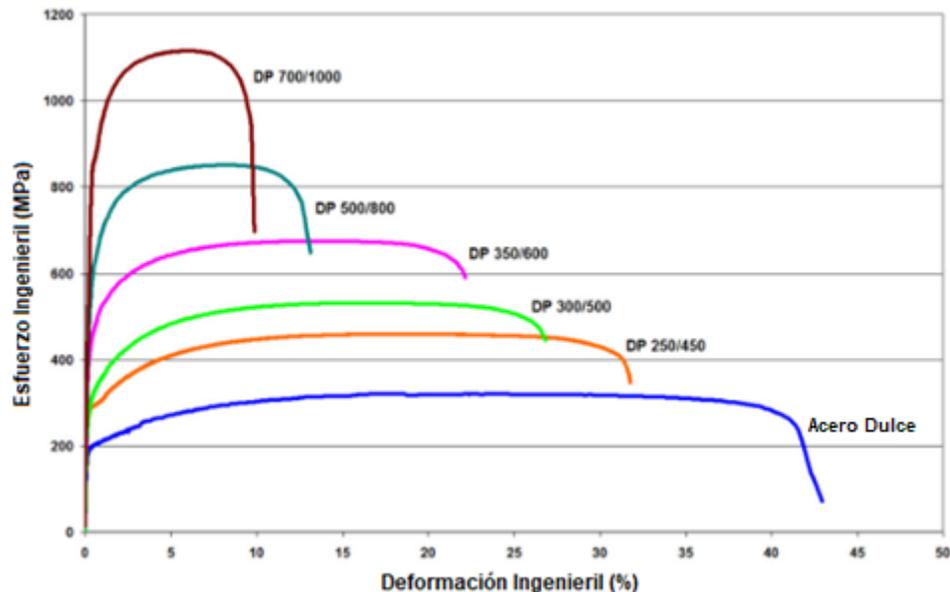


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación ingenieril para una serie de aceros DP con un espesor: DP 250/450 y DP 500/800 = 1 mm (WorldAutoSteel, 2022)

Los aceros DP se puede conformar en caliente o frío, si es laminado en caliente el enfriamiento debe ser controlado para producir la estructura ferrítico-martensítica a partir de la austenita si posteriormente se hace el recocido en caliente se produce una microestructura ferrítico-austenítica que al enfriar rápidamente una parte de la austenita se transforma en martensita, y se obtiene un acero DP excepcionalmente

dúctil. En la figura 5 se muestra la distribución esquemática de las fases (ferrita y martensita) presentes en este tipo de aceros, mientras que en la figura 6, se muestra la micrografía de un acero doble fase, en donde las zonas oscuras corresponden a la martensita y las zonas claras a la ferrita.

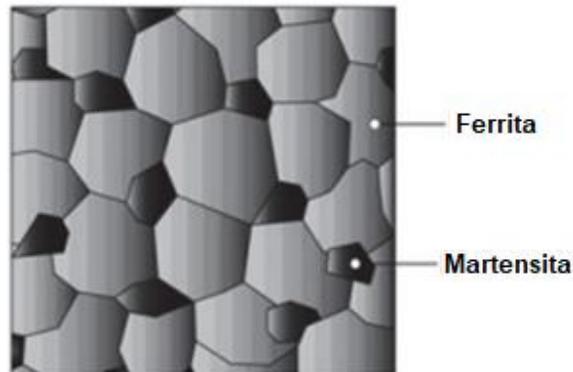


Figura 5. Microestructura de un acero doble fase (DP) (*WorldAutoSteel, 2022*)

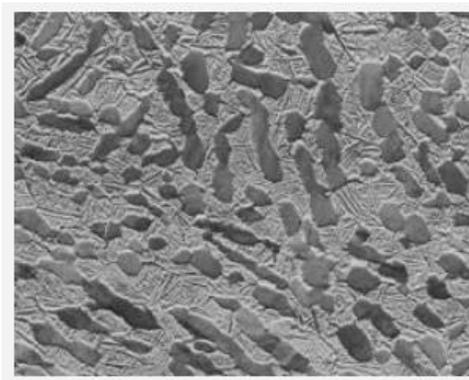


Figura 6. Micrografía de un acero doble fase (DP) (*WorldAutoSteel, 2022*)

Los aceros DP actualmente son los más utilizados por los fabricantes de autos ya que estos brindan mejor resistencia y se reduce el calibre de los componentes estructurales, algunas de las partes que se fabrican con aceros DP son las puertas, el cofre y la cajuela (*WorldAutoSteel, 2022*).

Aceros TRIP (Transformación inducida por plasticidad)

Los aceros TRIP tienen una microestructura que se componen de ferrita, bainita y austenita retenida, estos aceros tienen una resistencia a la tracción de 500 a 1050 MPa con una capacidad de elongación que va del 12 al 30%, la transformación de austenita en martensita se da cuando se alcanzan altos niveles de deformación, por lo que su uso es común en la fabricación de partes automotrices que están expuestas a colisiones.

En la figura 7 se muestra la distribución esquemática de las fases (ferrita, bainita, austenita retenida y martensita) presentes en este tipo de aceros, mientras que la figura 8 se muestra la micrografía de un acero TRIP, en donde la zona clara corresponde a la ferrita y las zonas oscuras que rodean a la fase clara están compuestas de bainita, austenita retenida y martensita.

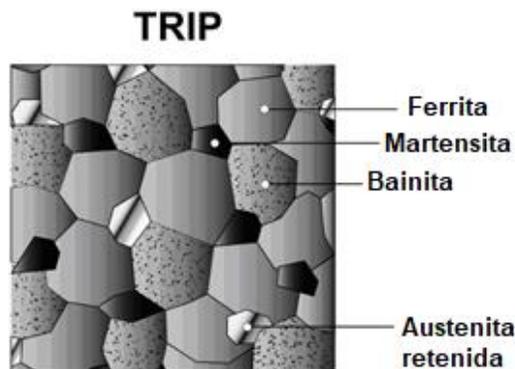


Figura 7. Microestructura típica de un acero TRIP (*M. Tamarelli, 2011*)

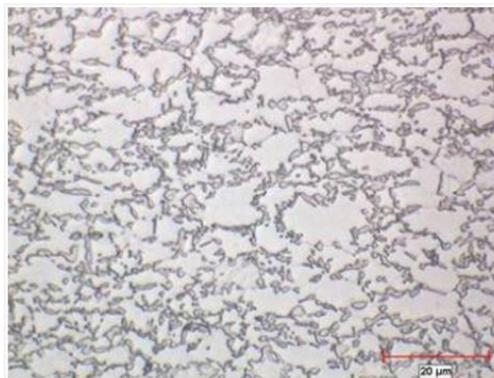


Figura 8. Micrografía de un acero TRIP (*WorldAutoSteel, 2022*)

Gracias a su alta tasa de endurecimiento tiene una excelente conformabilidad y una alta capacidad de estiramiento, gracias a esto se pueden fabricar piezas con geometrías complejas, los aceros TRIP son los más nuevos en desarrollo, sin embargo, las empresas siderúrgicas están trabajando para ofrecer una mayor variedad de estos aceros para aplicaciones automotrices, sus aplicaciones incluyen la carrocería y piezas auxiliares, y gracias a su capacidad de alta absorción de energía se fabrican piezas como los travesaños, vigas longitudinales, refuerzos de los pilares y refuerzos de los parachoques, Honda introdujo el uso de TRIP en el bastidor y la estructura de sus modelos MDX, RDX y CRV (Mallen, R., & S., 2008). En la figura 9 se muestra el comparativo del comportamiento mecánico de diferentes grados de aceros TRIP con otros AHSS.

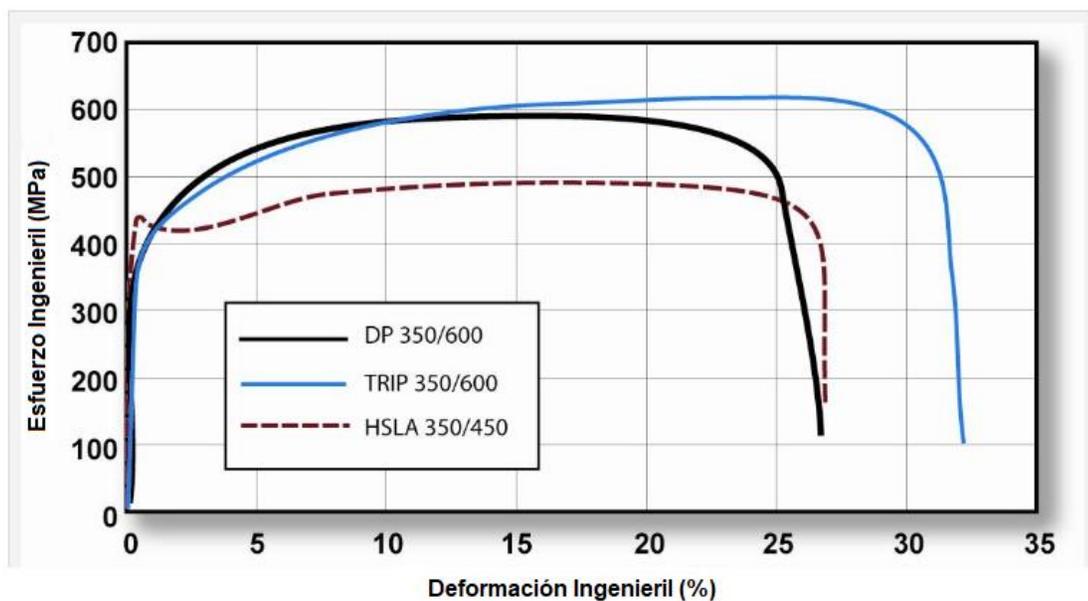


Figura 9. Curva esfuerzo-deformación ingenieril de un acero TRIP 350/600 con una elongación mayor que un acero DP 350/600 y un acero HSLA 350/450 (WorldAutoSteel, 2022)

Aceros de fase compleja (CP)

Este tipo de aceros tiene en su microestructura martensita, austenita retenida y perlita en un matiz de ferrita y bainita, lo cual da como resultado en sus propiedades mecánicas una alta resistencia a la tracción, una alta capacidad de absorción de impactos y alta capacidad de deformación residual, en comparación con los aceros de doble fase, los aceros de fase compleja tienen un límite elástico mayor con una tensión de rotura de 800 MPa.

En la figura 10 se muestra la distribución esquemática de las fases (ferrita, bainita, austenita retenida y martensita) presentes en aceros de fase compleja, mientras que la figura 11 se muestra la micrografía de un acero CP, en donde la zona clara corresponde a la ferrita y las zonas oscuras que rodean a la fase clara están compuestas de bainita, austenita retenida y martensita.

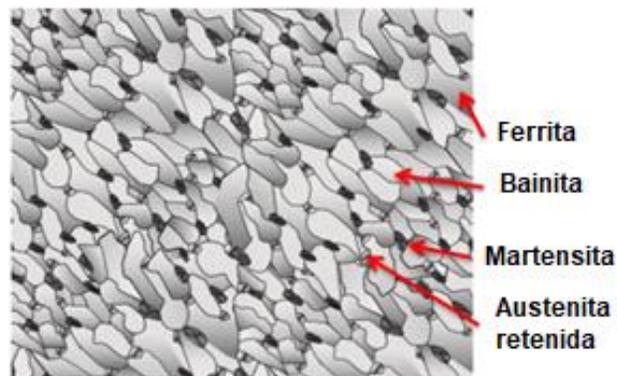


Figura 10. Esquema de una microestructura de acero de fase compleja que muestra martensita y austenita retenida en un matiz de ferrita-bainita (*WorldAutoSteel, 2022*)

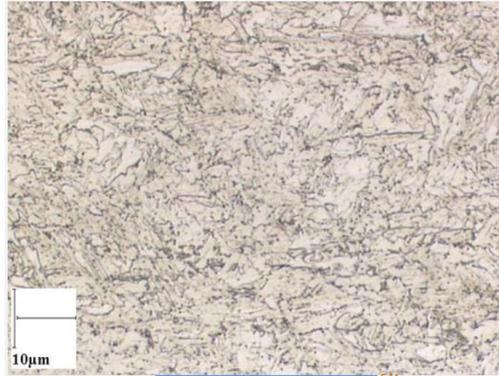


Figura 11. Micrografía de un acero de fase compleja (CP), HR800Y980T-CP (*WorldAutoSteel, 2022*)

Los aceros CP tienen varias aplicaciones en la industria automotriz, principalmente en la carrocería, la suspensión y los componentes del chasis, su alta absorción de impactos permite hacer componentes de seguridad contra choques, como vigas de impacto de puertas y refuerzos en el pilar B, BMW ha utilizado componentes CP para mejorar la colisión trasera (M. Tamarelli, 2011).

En la figura 12 se observa el comparativo del comportamiento mecánico de diferentes aceros de fase compleja.

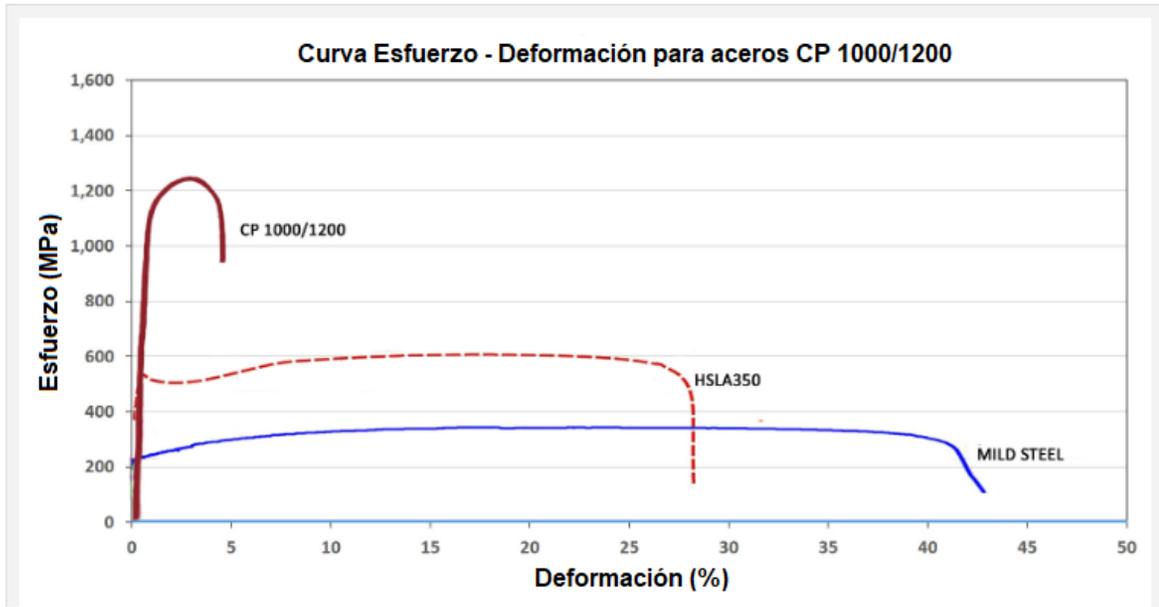


Figura 12. Comparación de curva esfuerzo-deformación de aceros HSLA 350/450 y CP 1000/1200 (WorldAutoSteel, 2022)

Aceros ferrítico - bainítico (FB)

La microestructura de los aceros FB está formada de ferrita y bainita la cual da mayor resistencia mecánica y una morfología de grano fino, la ventaja de este tipo de acero es la gran capacidad de conformación de bordes, su buena soldabilidad y alta resistencia a la fatiga.

En la figura 13 se muestra la distribución esquemática de las fases (ferrita y bainita) presentes en este tipo de aceros, mientras que en la figura 14 se muestra la micrografía de un acero FB en donde la zona clara corresponde a la ferrita y la zona con puntos a la bainita.

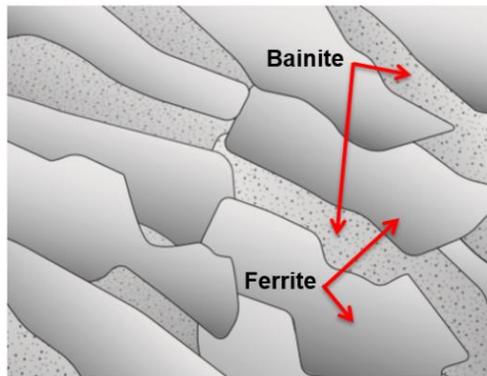


Figura 13. Microestructura de un acero ferrítico-bainítico FB (*WorldAutoSteel, 2022*)

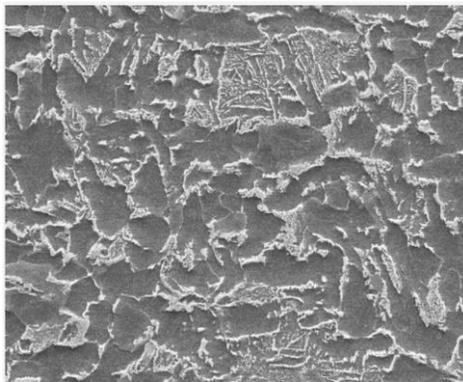


Figura 14. Micrografía de un acero ferrítico-bainítico (FB), HR400Y540T-FB (*WorldAutoSteel, 2022*)

Los aceros FB se desempeñan bien en condiciones de carga dinámica por lo que soporta cargas de vibración, es común que el acero FB estirado en frío se use para perfiles, piezas mecánicas, vigas transversales, ruedas y también se recomienda para la fabricación de la suspensión y el chasis de los autos por sus propiedades de fatiga en condiciones de carga dinámica (*WorldAutoSteel, 2022*).

La figura 15 muestra el comparativo del comportamiento mecánico de diferentes aceros ferrítico - bainítico.

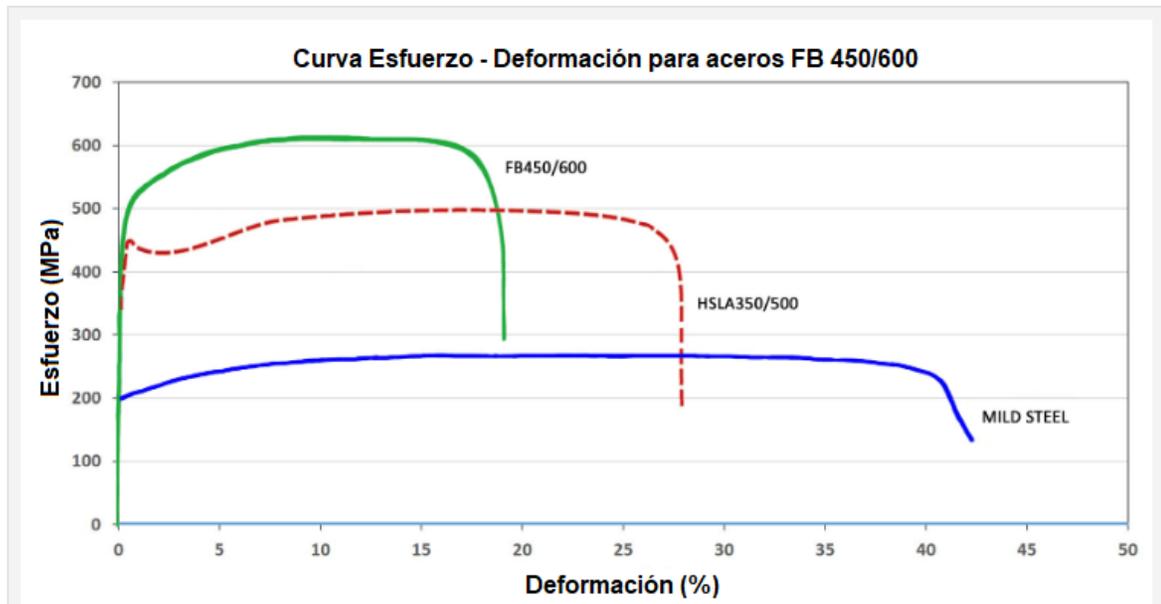


Figura 15. Comparación de curva esfuerzo-deformación para aceros HSLA 350/450 y FB 450/600 (WorldAutoSteel, 2022)

Aceros TWIP (Plasticidad inducida por maclaje)

Los aceros TWIP tienen un alto contenido de manganeso (12-25%) por lo que son completamente austeníticos a temperatura ambiente, el efecto de maclaje provoca que los granos actúen como múltiples bordes de grano, dando como resultado elevadas propiedades mecánicas, tienen una resistencia a la tracción de 900 a 1100 MPa con una capacidad de deformación del 55 al 70%.

En la figura 16 se muestran los maclajes de austenita retenida en un acero TWIP, mientras que en la figura 17 se muestran las marcas que se generan después de la deformación en este tipo de aceros.

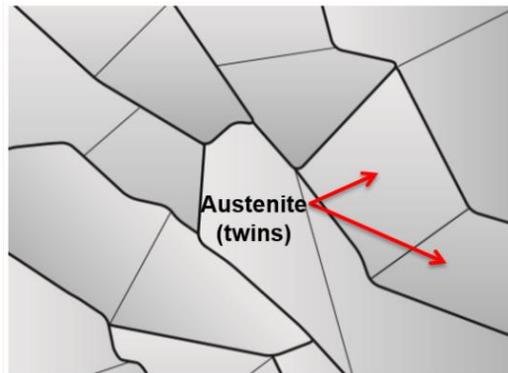


Figura 16. Microestructura de un acero TWIP (*WorldAutoSteel, 2022*)

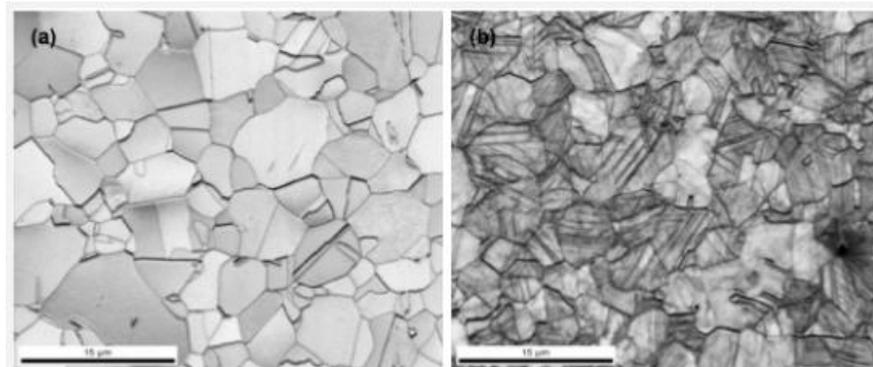


Figura 17. Acero TWIP recocido (izquierda) y después de la deformación (derecha) que muestra marcas de deformación. El número de maclajes de deformación aumenta con el incremento de tensión (*WorldAutoSteel, 2022*)

El acero TWIP recibió su nombre por su modo particular de deformación, donde el deslizamiento provoca la formación de límites de grano simétricos, restringiendo el movimiento de las dislocaciones a través del material que además de fortalecer el acero aumentan la tasa de endurecimiento por trabajo. Los aceros TWIP son conocidos por su gran capacidad elongación y su alta resistencia como se observa en la figura 18, donde se observa el comportamiento mecánico de distintos aceros TWIP, este tipo de aceros utilizan para la fabricación de torres de choque y refuerzos de la plataforma y otros componentes como el riel delantero (WorldAutoSteel, 2022).

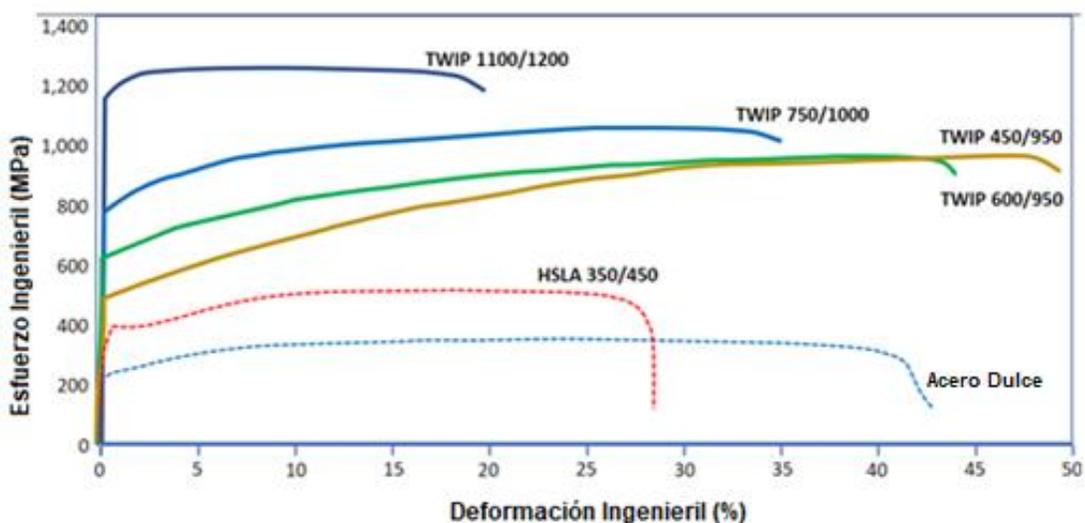


Figura 18. Curva esfuerzo-deformación de diferentes aceros TWIP (WorldAutoSteel, 2022)

Aceros martensíticos (MS)

Su microestructura se compone de bainita, ferrita y austenita que se transforma en martensita durante el proceso de templado, durante el proceso de fabricación se someten a un proceso de revenido lo que reduce su fragilidad y aumenta su conformabilidad. En la figura 19 se muestra la distribución esquemática de las fases (ferrita y martensita) presentes en este tipo de aceros, mientras que en la figura 20 se muestra la micrografía de un acero MS en donde la zona clara corresponde a la martensita y la zona oscura a la ferrita.

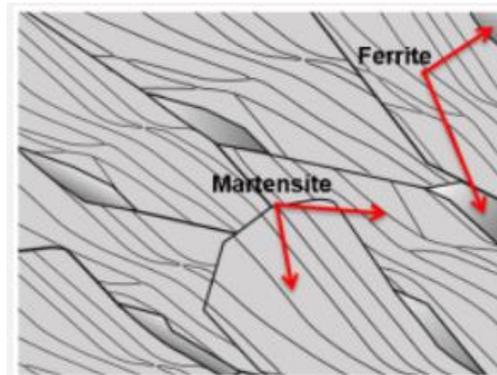


Figura 19. Microestructura de un acero martensítico (MS) (*WorldAutoSteel, 2022*)

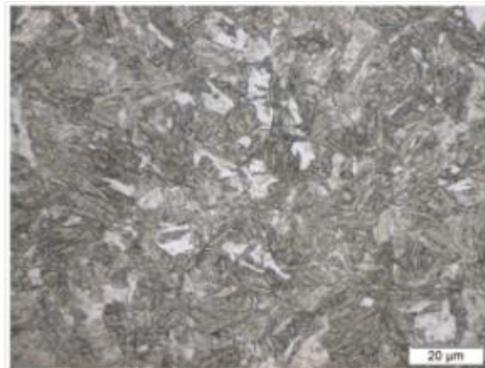


Figura 20. Micrografía de un acero martensítico (MS) 950/1200 (*WorldAutoSteel, 2022*)

Los aceros martensíticos (MS) tienen un alargamiento relativamente bajo (figura 21), pero el revenido posterior al enfriamiento rápido mejora la ductilidad permitiendo una conformabilidad adecuada y una resistencia extrema. Es común que las empresas automotrices utilicen aceros MS en partes donde la resistencia es

crítica, a menudo se utiliza para hacer piezas auxiliares y estructurales, también se recomienda su uso para partes de parachoques y vigas de intrusión de puertas, refuerzos de los paneles laterales, líneas de cintura, resortes y clips, Honda fabrica la viga de parachoques con este acero mejorando la protección trasera contra impactos (WorldAutoSteel, 2022).

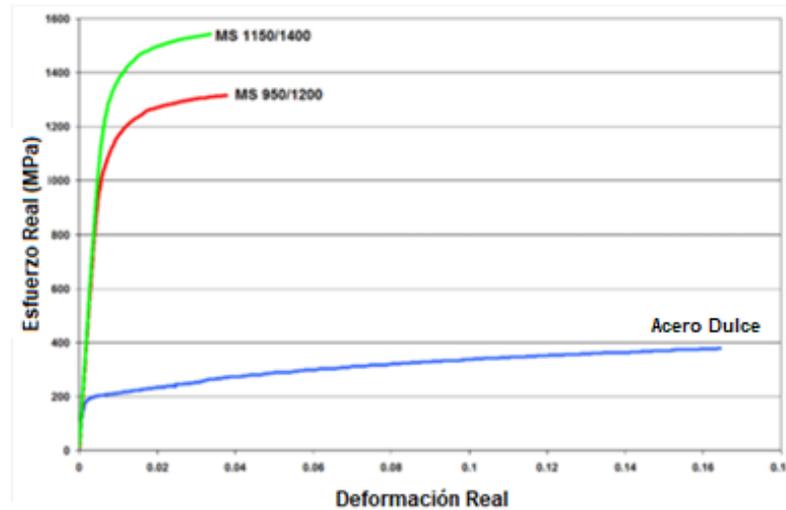


Figura 21. Curva esfuerzo-deformación de una serie de aceros MS con un espesor de 1.8 mm a 2 mm (WorldAutoSteel, 2022)

Tratamientos termomecánicos usados para la obtención de un acero TRIP

La microestructura de un acero TRIP se obtiene a través de tratamiento de laminado en frío o laminado en caliente, ambos consisten en dos etapas críticas, primero se realiza el recocido intercrítico (RI) y posteriormente se hace el tratamiento austemperado a una temperatura de 300°C y 500°C, permitiendo que se dé el enriquecimiento de carbono en la austenita, estabilizándola a temperatura ambiente como se observa en la figura 22.

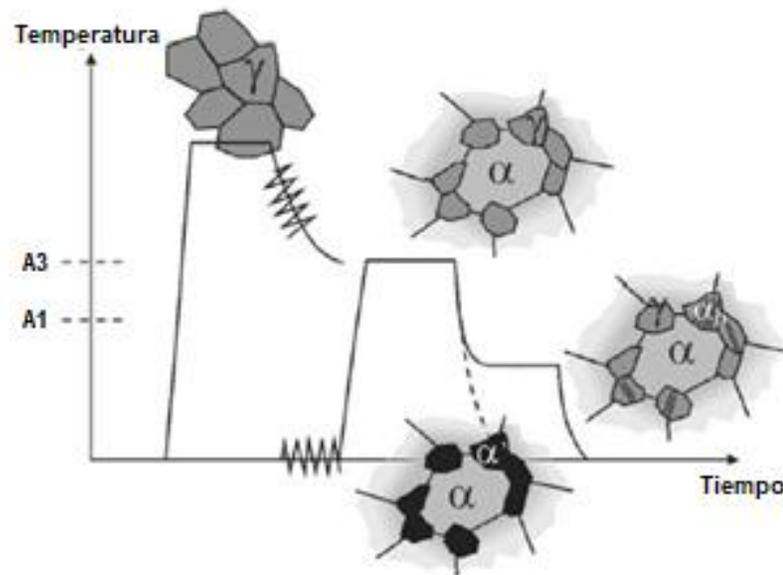


Figura 22. Representación esquemática del tratamiento termomecánico aplicado para laminado en caliente o frío en aceros TRIP multifase (γ : austenita, α : ferrita, α^A : martensita, α_b : bainita) (P. J., 2004)

Los aceros TRIP se fabrican de carbono (0.1 a 0.4%), manganeso (1.5 a 2.5%) y silicio el cual se encuentra en grandes cantidades (1.5 a 2.5%) inhibir la precipitación de cementita durante la transformación bainítica.

Esta composición química junto a las dos etapas del tratamiento termomecánico genera un contenido de austenita retenida de entre 5 a 20%, durante el proceso intercrítico A_1 y A_3 , el carbono y el manganeso se concentran en la austenita por su baja solubilidad en la ferrita, cuando se obtiene la ferrita necesaria se enfría

rápidamente a temperatura bainítica para prevenir la formación de perlita, el cambio en la estructura de un acero TRIP se comporta de la siguiente forma (P. J., 2004):

1. Recocido intercrítico: se forma la ferrita (α) y la austenita (γ).
2. Tratamiento de austemperado: la austenita (γ) se transforma en bainita (α_b), posteriormente se da el enriquecimiento de la austenita.
3. Microestructura final: se tiene ferrita (α), ferrita bainítica (α_b) y austenita retenida metaestable (γ_R),.

Durante el recocido intercrítico y la temperatura de transformación bainítica es importante usar velocidades de enfriamiento altas (aproximadamente 20°C/s) para evitar la formación de perlita en la microestructura para producir una reducción de carbono en la austenita haciendo la estabilidad en la austenita también se vea reducida (figura 23).

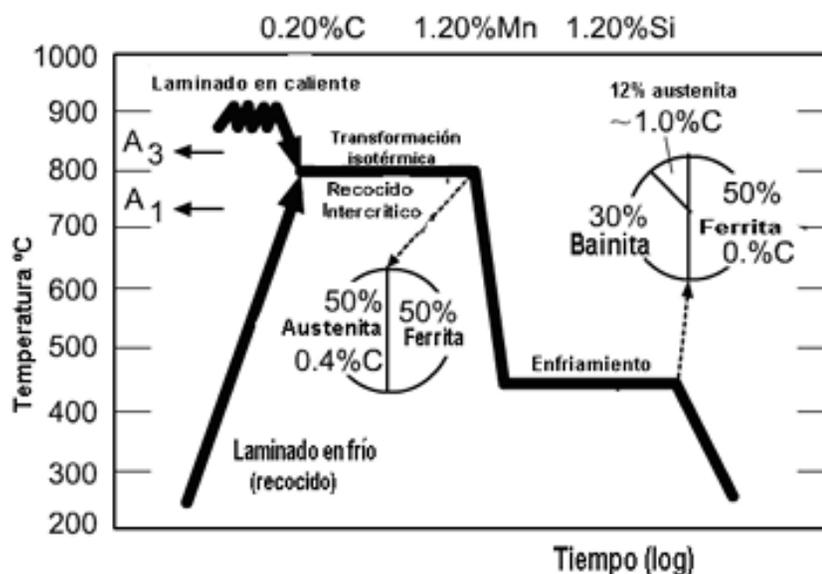


Figura 23. Esquema de procesamiento y evolución estructural durante el tratamiento térmico en un acero TRIP (Del Castillo Rodríguez, 2009)

En el periodo de retención isotérmica la austenita se transforma en bainita con bajo contenido de carbono haciendo que la austenita restante tenga mayor contenido de carbono, el proceso se repite hasta que la concentración de carbono en la austenita

restante sea igual valor de la temperatura a la cual la energía libre de Gibbs de ferrita es igual a la austenita con la misma composición. La energía libre de la ferrita es más baja que la energía de la austenita y esto proporciona la energía necesaria para la transformación bainítica sin difusión. Con la presencia de elementos como silicio el carbono es expulsado de la bainita hacia la austenita aumentando el contenido de carbono en la austenita.

Los aceros TRIP en términos de plasticidad por transformación son importantes cuatro rangos de temperatura, los cuales se observan en la figura 24, donde:

- Por debajo de la temperatura M_s : la austenita es termodinámicamente inestable y la transformación martensítica se da sin la necesidad de deformación.
- Rango M_s - M_s : En M_s la tensión necesaria la transformación martensítica de la austenita retenida es igual al límite elástico de la fase austenítica inicial.
- Rango M_s - M_d : La austenita se deforma por encima de la temperatura M_s , la fluencia de la austenita se da por deslizamiento y su transformación es principalmente inducida por deformación.
- $T > M_d$: La temperatura M_d está por encima de la cual no se produce transformación martensítica, la temperatura más alta da como resultado una energía de falla de apilamiento más alta y una fuerza impulsora más baja provocando que no se produzca deformación como resultado de un esfuerzo.

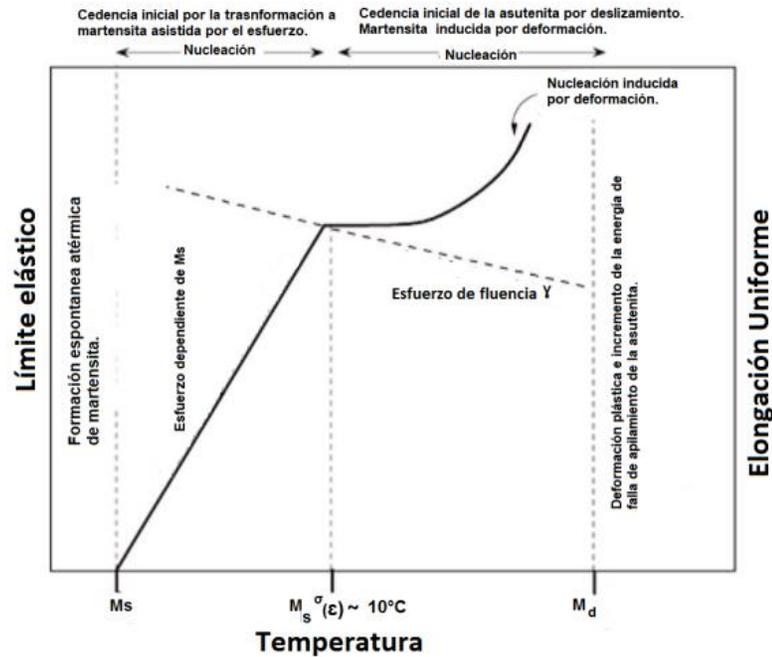


Figura 24. Regímenes asistidos por tensión e inducidos por deformación de transformación martensítica inducida mecánicamente (P., L., Y., K., & J., 2012)

Conformado de los aceros AHSS

Para obtener aceros AHSS con buenas propiedades mecánicas, los ciclos termomecánicos son muy importantes, la temperatura y la velocidad de enfriamiento deben controlarse para obtener las microestructuras que se desean.

Usando un diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) (figura 25) es posible obtener las diferentes fases al hacer el tratamiento térmico en el acero utilizando las temperaturas intercríticas, la transformación se obtiene al enfriar y calentar el material lentamente.

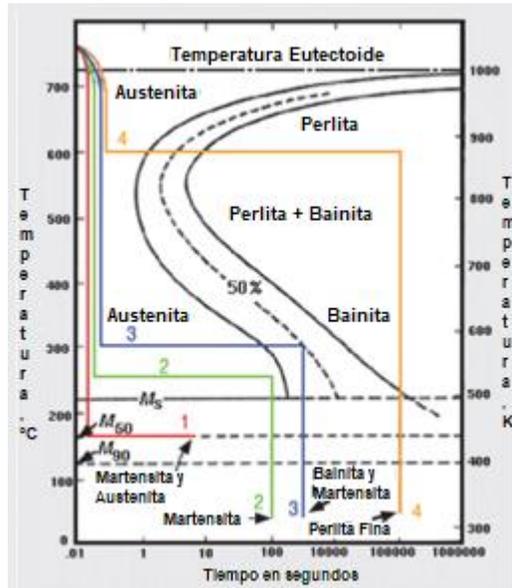


Figura 25. Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) (M. Tamarelli, 2011)

Los aceros AHSS requieren un control preciso en los procesos de laminado, recocido y galvanizado en caliente y frío. Las empresas siderúrgicas están trabajando en el desarrollo de nuevos materiales y gran parte de su trabajo se centra en la creación de nuevos procesos y desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la producción reduciendo el tiempo y los costos de los ciclos para la producción de piezas con aceros AHSS (M. Tamarelli, 2011).

Aceros TRIP

El acero TRIP recibió su nombre por su comportamiento durante la deformación plástica, donde además de la dispersión de fases, la austenita se transforma en martensita, la deformación necesaria para iniciar el proceso de transformación se controla regulando la estabilidad de la austenita mediante su contenido de carbono, tamaño y morfología.

La austenita retenida también se transforma progresivamente en martensita con el aumento de la deformación, incrementando su tasa de endurecimiento por trabajo a niveles de deformación más altas, es esto lo que se conoce como efecto TRIP. En la figura 26 se muestra el comportamiento mecánico de distintos tipos de acero (HSLA, DP y TRIP) con el mismo límite elástico nominal, donde, el acero TRIP tiene una tasa de endurecimiento por trabajo inicial más baja que el acero DP, pero la tasa de endurecimiento continua con deformaciones más altas donde el endurecimiento por trabajo del acero doble fase disminuye.

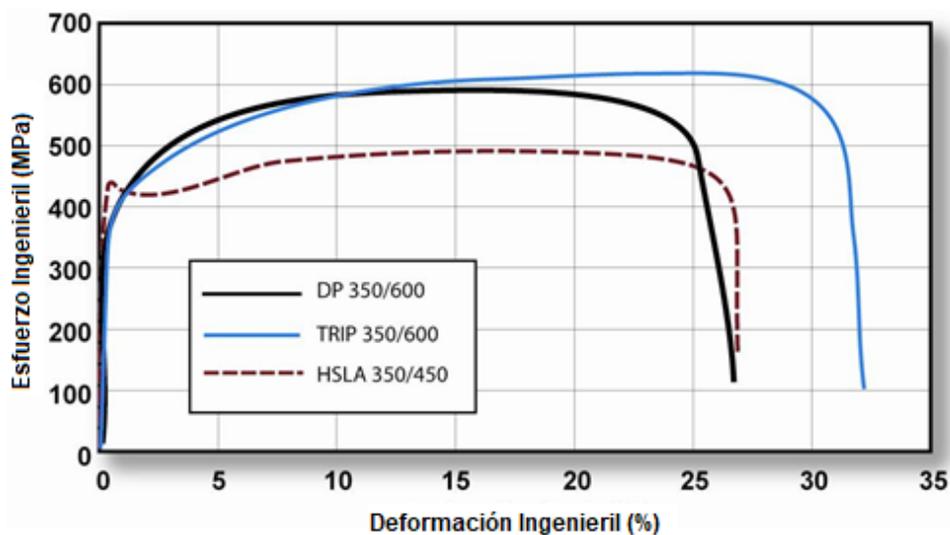


Figura 26. Acero TRIP 350/600 con mayor alargamiento total que un acero DP 360/600 y HSLA 350/450 (WorldAutoSteel, 2022)

La respuesta en el endurecimiento por deformación de los aceros TRIP es mayor que en los aceros HSS, dando como resultado una mayor conformabilidad en la deformación por estiramiento. La mejora en la conformabilidad por estiramiento es particularmente útil cuando los diseñadores aprovechan la respuesta mejorada de endurecimiento por deformación para diseñar una pieza, utilizando las propiedades mecánicas de la forma, lo cual proporciona una ligera ventaja sobre los aceros DP en aplicaciones de formación por estirado más severas. (WorldAutoSteel, 2022)

Fenómeno TRIP

En los aceros TRIP, la austenita se deforma a temperaturas por encima de M_s , pero por debajo de la temperatura M_d Crítica, transformándose en martensita si se alcanza una deformación crítica, este fenómeno implica que la transformación de austenita metaestable en martensita endurece el material en la zona donde se produce la deformación impidiendo que se localicen más deformaciones en la misma región, tal como se muestra en la figura 27.

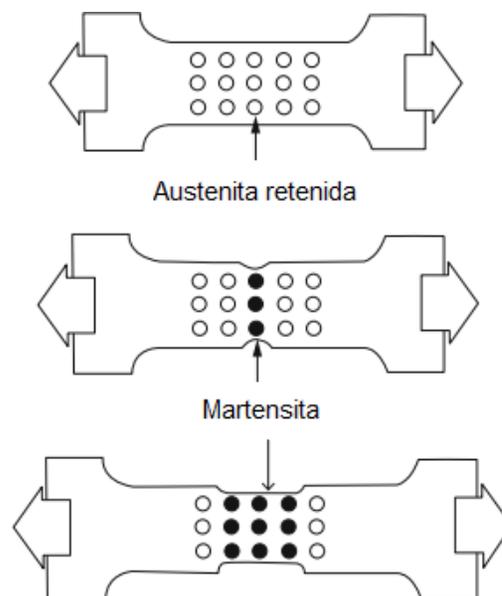


Figura 27. Fenómeno TRIP: los círculos negros designan los puntos donde la austenita se ha transformado en martensita (Fonstein, 2015)

Este comportamiento se repite en toda la muestra garantizando una tasa de deformación muy alta que facilita la elongación uniforme del material (Fonstein, 2015).

Mecanismos de deformación de la austenita retenida en un acero TRIP

Para crear microestructuras de acero con austenita retenida, recientemente se ha propuesto un nuevo método de procesamiento, “temple y partición” (Q&P, quenching and partitioning), el cual consiste en templar la austenita por debajo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica, seguido de un tratamiento de partición para enriquecer la austenita restante con carbono, este proceso estabiliza a la austenita a temperatura ambiente.

Un acero TRIP con propiedades mecánicas óptimas contiene austenita retenida entre un 8% a un 15%, sin embargo, su estabilidad depende de varios parámetros, como en se observa en la figura 28, los cuales son:

- Composición química de la austenita retenida y su energía intrínseca de falla de apilamiento.
- La reducción del tamaño de la austenita retenida (factor de estabilización crucial).
- El estado de tensión, la fuerza de la austenita, y la presencia de otras fases.
- Morfología y distribución de la austenita retenida en la microestructura.

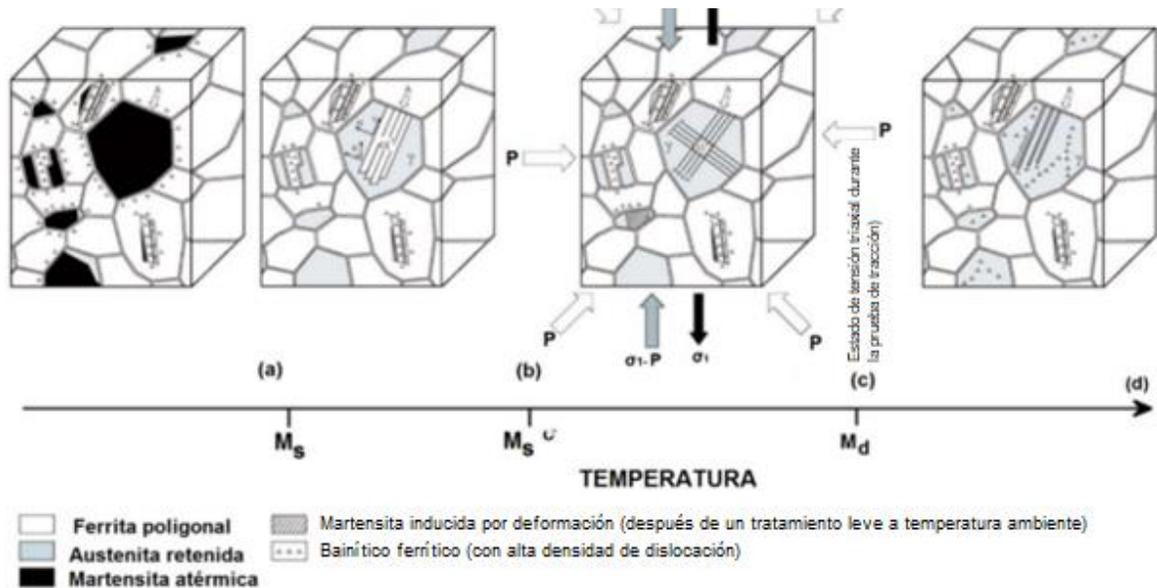


Figura 28. Mecanismos dominantes de deformación en diferentes rangos de temperatura en un grano de austenita retenida en acero TRIP: (a) formación de martensita atérmica, (b) plasticidad inducida por la tensión, (c) plasticidad inducida por la deformación, y (d) deslizamiento de dislocaciones con formación de micromaclas. Además, (c) muestra el estado de tensión triaxial de un elemento de volumen sometido a una transformación de fase martensítica durante un ensayo de tensión (P., L., Y., K., & J., 2012)

Los aceros TRIP en comparación con otros aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) han beneficiado de manera significativa a la industria automotriz por la gran capacidad de absorción de energía que se produce durante una colisión.

La figura 29 compara la absorción de energía en función de la resistencia a la tracción de aceros doble fase, TRIP, bainítico, acero con bajo contenido de carbono y acero estructural, donde, el acero TRIP posee la ventaja de tener una mejor absorción de energía constante a medida que aumenta la velocidad de deformación.

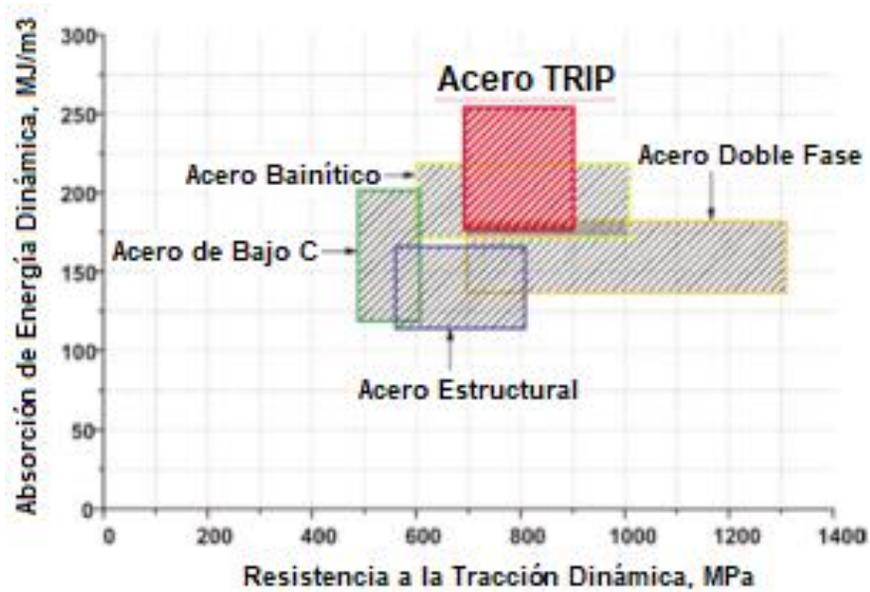


Figura 29. Energía dinámica absorbida en función de la resistencia a tensión para aceros doble fase, TRIP, bainíticos, con bajo contenido de carbono y acero estructural (P., L., Y., K., & J., 2012)

La energía absorbida se calcula con el área por debajo de la curva esfuerzo – deformación y la energía resultante se traza en función de la velocidad de deformación para evaluar la efectividad de absorción de energía durante los ensayos dinámicos de un acero TRIP (P., L., Y., K., & J., 2012)

Composición química de los aceros TRIP

La composición química es la parte más importante en la fabricación de aceros TRIP, ya que está nos permite optimizar la cantidad de austenita retenida, controlar la precipitación de la cementita, incrementar la resistencia de la ferrita y aumentar la templabilidad evitando la precipitación de perlita, la composición química necesaria para fabricar un acero TRIP es la siguiente (Verliden, 2007):

- **Carbono:** el contenido de carbono es de entre 0.1% y 0.35% en peso, el carbono estabiliza la austenita durante el procesamiento, también tiene un papel fundamental en la fracción volumétrica de las fases presentes en la microestructura.
- **Silicio:** el contenido de silicio es de entre 0.5% y 2.4% en peso, éste retrasa la formación de carburos ya que los átomos de carbono rechazados por la austenita son absorbidos por la austenita retenida evitando su precipitación en forma de carburos, la presencia de silicio en la composición química inhibe la formación de cementita durante la transformación bainítica estabilizando la austenita indirectamente a temperatura ambiente, se debe tener en cuenta que en aceros con bajo carbono el silicio puede formar óxidos superficiales generando problemas durante el galvanizado.
- **Manganeso:** el contenido de manganeso es de entre 0.83% y 1.6% en peso, el manganeso aumenta la estabilidad y ayuda a retener la austenita a temperatura ambiente, también evita la formación de perlita durante el enfriamiento, sin embargo, concentraciones elevadas provocan una alta estabilidad de austenita retenida a temperatura ambiente evitando el fenómeno TRIP en el acero.
- **Aluminio:** el contenido de aluminio está entre 0.03% y 1.5% en peso y se considera un sustituto parcial del silicio gracias a su efecto inhibitorio de la cementita, en comparación con el silicio, el aluminio no se considera un

elemento fortalecedor de la ferrita, por lo que una sustitución total disminuiría considerablemente la resistencia mecánica del acero.

Impacto microestructural y propiedades químicas del acero TRIP

Los elementos aleantes son de gran importancia para obtener las características TRIP, la mayor parte de estos aceros son de bajo carbono, lo cual complica la estabilización de la austenita, por tal motivo, se necesitan elementos aleantes que ayuden a que la austenita logre un tamaño de grano pequeño con límites bien definidos. (Gonzalez Duarte, 2011)

Las propiedades mecánicas de los aceros TRIP se deben a la transformación martensítica de la austenita retenida inducida por tensión, la austenita retenida puede afectar las propiedades mecánicas de la siguiente manera (A., G., R., & A., 2006):

- La austenita puede transformarse en martensita durante el enfriamiento del agua y mejorar la resistencia del acero.
- La austenita retenida puede aumentar la resistencia al mejorar su capacidad en los límites de listones para el movimiento de dislocación.
- La austenita retenida puede aumentar el alargamiento debido al efecto TRIP.

Los tratamientos térmicos utilizados para obtener la microestructura TRIP tiene dos etapas, las cuales son (Gonzalez Duarte, 2011):

1. En la primera etapa, se calienta el material por 8 minutos a 750°C, es decir, 22°C por encima de la temperatura Ac1, esto corresponde al punto de transformación de ferrita-perlita a ferrita austenita.
2. La segunda etapa consiste en mantener el material 3 minutos a la temperatura de transformación bainítica (561°C) para que una parte de la austenita se transforme en martensita, y se enfríe el material a temperatura ambiente.

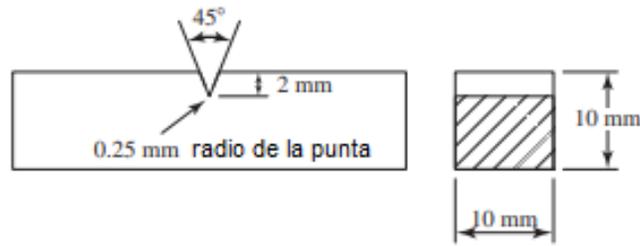
El objetivo de analizar las muestras tratadas térmicamente es obtener información de los mecanismos de transformación de fase y relacionar las propiedades mecánicas y la microestructura de las muestras. (S., J., & W., 2004)

Pruebas de impacto

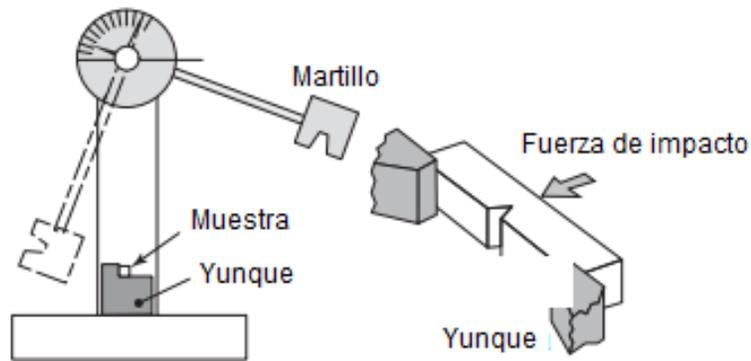
El péndulo Charpy creado por el francés Agustín Georges Albert Charpy (1965-1965) es una máquina de ensayo simple desde el punto de vista mecánico, con él se pueden diseñar pruebas de impacto y demostrar de forma rápida la influencia que tienen determinados factores en el comportamiento mecánico de los materiales. A través de este equipo se puede determinar el comportamiento de los materiales al impacto, el proceso consiste en golpear con una determinada masa la probeta situada en el soporte, la masa (m) se encuentra acoplada al extremo del péndulo a una longitud (l), se deja caer desde una altura (h) y se controla la velocidad de aplicación de la carga al momento del impacto (E. Shallman & J. Bishop, 2002).

El ensayo Charpy emplea el péndulo Charpy (figura 30) y se usa para determinar la tenacidad de un material, los ensayos de impacto se hacen sobre una probeta entallada y ensayada a flexión sobre tres puntos, la diferencia entre la altura inicial del péndulo (h_0) y la altura final tras el impacto (h_f) permite medir la energía absorbida durante la fractura de la probeta, la energía absorbida se mide en el área debajo de la curva de carga, este desplazamiento se conoce como resiliencia.

La velocidad que adquiere la masa al golpear la probeta se determina por la altura del péndulo, tras la rotura, la masa continua hasta llegar a determinada altura, a partir de la cual se determina la energía absorbida por el golpe.



(a)



(b)

Figura 30. Ensayo Charpy en (a) se observa la muesca de la muestra y en (b) la máquina de impacto pendular (J. McEvily, 2013)

La norma ASTM E-23 describe las pruebas de impacto en probetas metálicas entalladas, así como, los métodos de ensayo utilizados para medir la energía absorbida por el espécimen roto, en los ensayos Charpy se requiere que la muestra de metal entallada esté soportada por ambos extremos (horizontalmente) y se rompa por el impacto el martillo en la parte contraria a la entalla.

La energía que absorbe la probeta tras el impacto puede ser determinada mediante la siguiente ecuación:

$$Ea = M(h_0 - h_f)g = Ml(\cos\beta - \cos\alpha)g$$

Donde:

- Ea : Es la energía usada para romper la probeta.
- M : Es la masa del péndulo medida en kilogramos.
- h_0 : Es la altura inicial.
- h_f : Es la altura final.
- l : Es la longitud del péndulo medida en metros.
- α : Es el ángulo inicial.
- β : Es el ángulo final
- g : Es la gravedad.

Las características más importantes según la norma ASTM E-23 son las que se muestran en la figura 31:

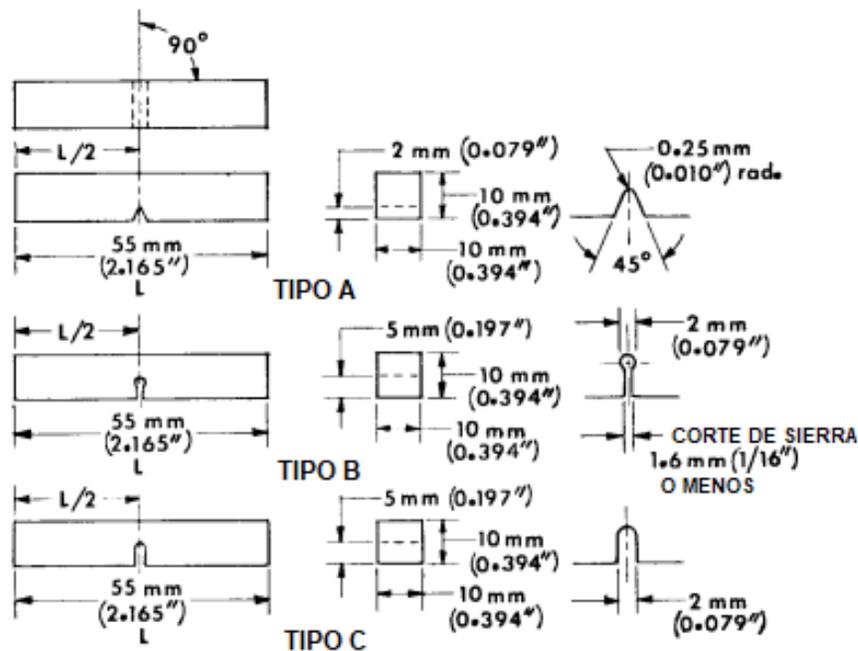


Figura 31. Geometría y dimensiones de los tipos de probetas Charpy (ASTM International, 2000)

Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos x (DRX) es una técnica utilizada en el análisis de la estructura cristalina de los materiales sólidos, a través del análisis de la difracción de fotones de rayos x. El fenómeno de difracción depende de la estructura cristalina del material y de la longitud de onda del fotón incidente. En esta técnica, un haz de rayos x con longitud de onda entre 0.5 y 2Å, se hace incidir la muestra. Este haz es difractado por los planos cristalinos de la muestra de acuerdo con la ley de Bragg (Ipohorski & B. Bozzano, 2013):

$$2d\text{Sen}\theta = \lambda$$

Dónde:

d: es la distancia entre los planos atómicos de la fase cristalina.

λ : es la longitud de onda de los fotones incidentes.

θ : es el ángulo de incidencia

Capítulo 2: Procedimiento experimental

En el siguiente capítulo se describe la secuencia de pasos utilizada para la obtención de un acero TRIP, el cual será utilizado para analizar la transformación martensítica que sufre la austenita retenida presente en el acero cuando se somete a deformación plástica.

En la figura 32 se muestra el diagrama de flujo de las diferentes etapas del procedimiento experimental:

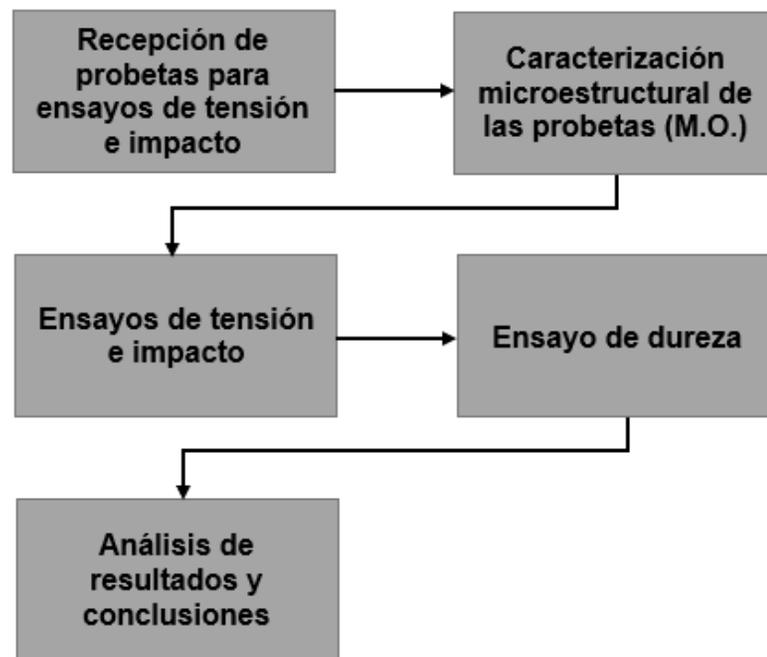


Figura 32. Diagrama de flujo de las etapas del proceso experimental

Recepción de probetas para ensayos de tensión e impacto

Se recibieron tres lotes de probetas en acero TRIP para ensayos de tensión, impacto y caracterización microestructural, los cuales fueron procesados en el Instituto Tecnológico de Morelia. Cada lote de probetas corresponde a una composición química, las cuales son diferentes entre sí.

Las probetas para caracterización fueron encapsuladas en baquelita y se realizó en el laboratorio de metalografía en el Instituto Tecnológico de Morelia con una montadora marca Struers modelo Cito-Press-1 (figura 33).



Figura 33. a) Pieza montada en baquelita, b) Montadora de probetas en baquelita

Caracterización microestructural de las probetas (M.O. y DRX)

La microestructura del acero de las probetas recibidas fue caracterizada mediante dos técnicas: microscopía óptica (M.O.) y difracción de rayos X (DRX). Para el revelado de la microestructura, se realizó la preparación metalográfica tradicional de desbaste con lija (180-2000), seguido de pulido en paño con pasta de diamante de 3 y 1 μ m. Posteriormente, las muestras fueron atacadas con nital al 3%.

Microscopio Óptico

La caracterización microestructural de las muestras se realizó en el laboratorio metalográfico de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún, el equipo que se utilizó (figura 34) es un microscopio marca Nikon Eclipse modelo MA100.



Figura 34. Microscopio óptico Nikon

Difracción de rayos x (DRX)

Las pruebas de difracción de rayos x se realizaron en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se utilizó el equipo marca Bruker modelo D8 ADVANCE (figura 35), el cual cuenta con un tubo de cobre para la radiación $K\alpha$ y monocromador.



Figura 35. Equipo de difracción de rayos x marca Bruker.

Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina de ensayos universales marca INSTRON modelo 1195 y cuenta con un extensómetro de 5 mm (figura 36), el cual se encuentra en el laboratorio de pruebas mecánicas del Posgrado en Metalurgia del Instituto Tecnológico de Morelia campus 2, los ensayos se realizaron a temperatura ambiente (25 °C) y se utilizó una velocidad de deformación de 2 mm min⁻¹.



Figura 36. Máquina de ensayos de tensión

Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto se realizaron en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey campus Morelia, se utilizó un equipo marca INSTRON modelo SI-1K3 (figura 37).

El ensayo de impacto se realizó a tres probetas de cada composición química a temperatura ambiente 25 °C.



Figura 37. Máquina para ensayos de impacto Charpy

Ensayo de dureza

Los ensayos de dureza se realizaron sobre las probetas de tensión después del ensayo de tracción de acuerdo a la norma ASTM-E8. Las mediciones se realizaron en tres zonas (zona de estricción o ruptura, cambio de sección y hombro de la probeta) de la sección normal (figura 38a) y sección transversal de la probeta (figura 38b).

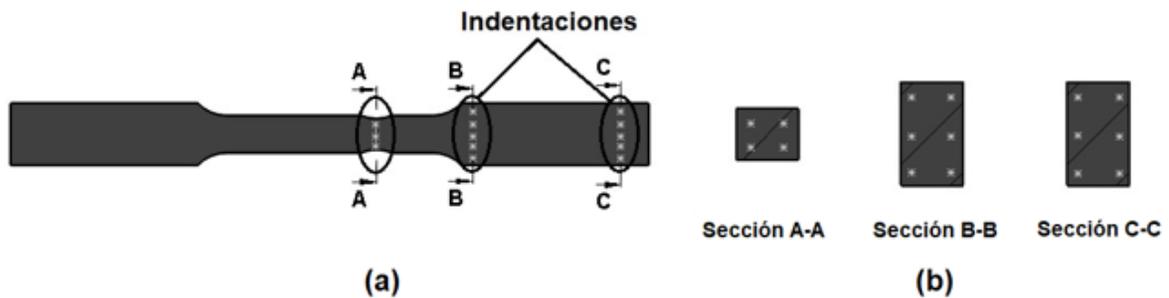


Figura 38. Zonas del ensayo de dureza a) Sección normal, b) Sección transversal (ASTM International, 2013)

El ensayo de dureza se realizó en el taller de metalografía de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún, para llevarlo a cabo se utilizó el durómetro marca HOYTOM Super Rockwell–Duplex–713–Sr (figura 39).



Figura 39. Durómetro HOYTOM

Capítulo 3: Análisis de resultados

En la figura 40 se muestran las probetas de tensión y para caracterización montadas en baquelita que fueron recibidas.

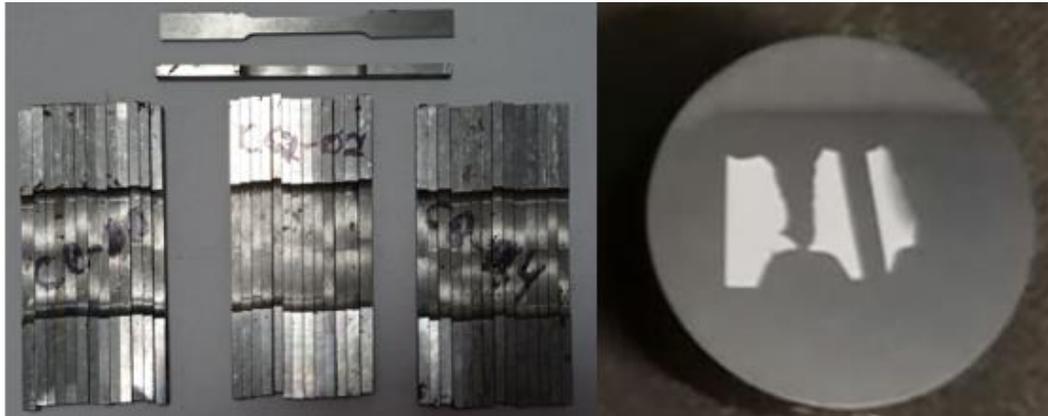


Figura 40. Lote de probetas de aceros TRIP recibidas

En la tabla 4 se muestra la composición química de los tres lotes de acero TRIP recibidos.

Tabla 4. Composición química del acero estudiado (% peso)

Composición química						
Acero	C	Si	Mn	Al	P	S
CQ-00	0.202	0.97	1.2	0.52	0.017	0.028
CQ-02	0.214	0.73	1.57	0.74	0.018	0.03
CQ-04	0.199	0.46	1.69	1.00	0.107	0.029

Los tres lotes de acero fueron previamente laminados en caliente y posteriormente fueron maquinados para obtener probetas de tensión de acuerdo a la norma ASTM-E8M (anexo 2), así como, para probetas de impacto de acuerdo con la norma ASTM-E23 (anexo 3), una vez maquinadas las diferentes probetas se realizó el tratamiento térmico con el cual se obtuvo una microestructura final compuesta de ferrita, bainita y austenita retenida.

Caracterización microestructural de las probetas (M.O. y DRX)

Microscopía óptica

En este proceso se realizó el lijado y pulido de la muestra hasta obtener un acabado espejo, la probeta tiene tres muestras que corresponden a cada composición química (CQ-00, CQ-02 y CQ-04) (figura 41) las cuales se observaron en el microscopio para analizar su microestructura.



Figura 41. Muestra de acero TRIP (vista superior imagen izquierda y vista inferior imagen derecha)

Antes de pulir la pieza se realizó el lijado de la misma hasta exponer por completo las tres muestras y eliminar las rayas superficiales de forma gradual con lija, una vez eliminadas todas las rayas, se pulió la pieza con paño y pasta de diamante de 3 y 1 μ m (figura 42) hasta obtener un acabado espejo, para posteriormente exponerla al ataque químico con nital al 3% y así realizar la captura de imágenes mediante el microscopio óptico.

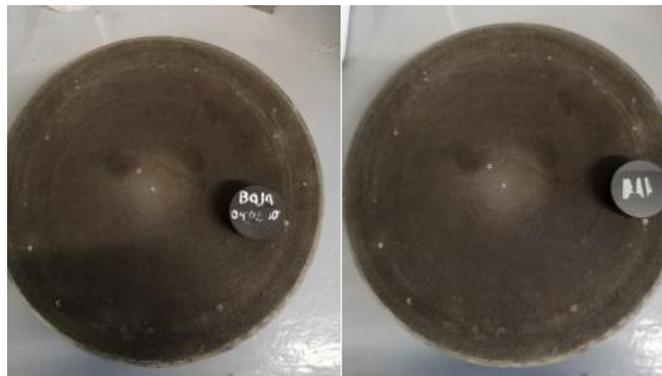


Figura 42. Pulido de muestra de acero TRIP para obtener acabado espejo

En la figura 43 se muestra la microestructura del acero TRIP CQ-00, en la cual se puede observar zonas claras, las cuales están rodeadas de pequeños granos y zonas oscuras. Las zonas claras corresponden a la Ferrita (fase suave) mientras que las zonas oscuras y alargadas corresponden a la bainita, los pequeños granos podrían tratarse de austenita retenida y/o martensita, se requiere realizar difracción de rayos X para identificar la fase correspondiente.

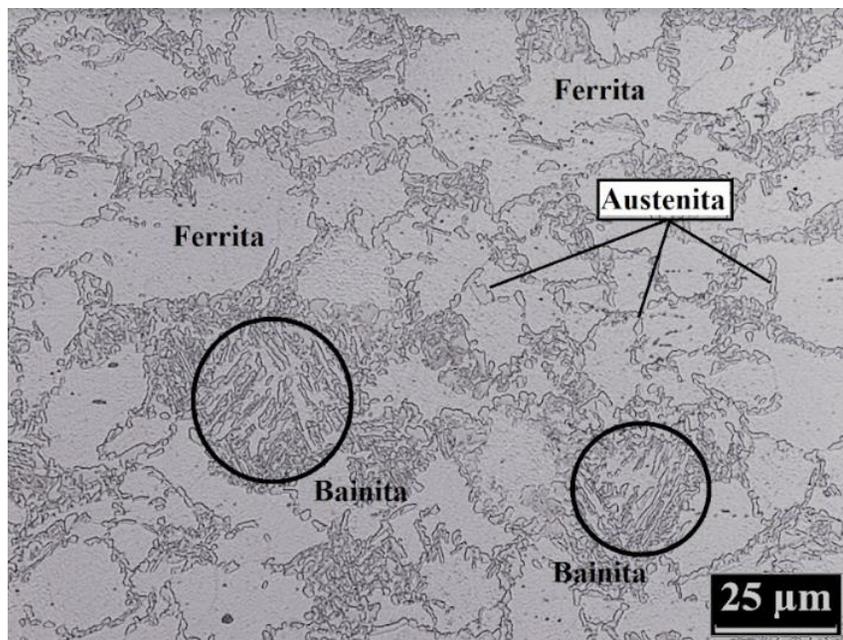


Figura 43. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita (αb) y austenita (γ) en la muestra 00

En la figura 44 se muestra la microestructura del acero TRIP CQ-02, en la cual se puede observar zonas claras, las cuales están rodeadas de pequeños granos y zonas oscuras. Las zonas claras corresponden a la Ferrita (fase suave) mientras que las zonas oscuras y alargadas corresponden a la bainita, los pequeños granos podrían tratarse de austenita retenida y/o martensita, se requiere realizar difracción de rayos X para identificar la fase correspondiente. La microestructura de esta composición las zonas claras (ferrita) son de menor tamaño en comparación de la composición CQ-00.

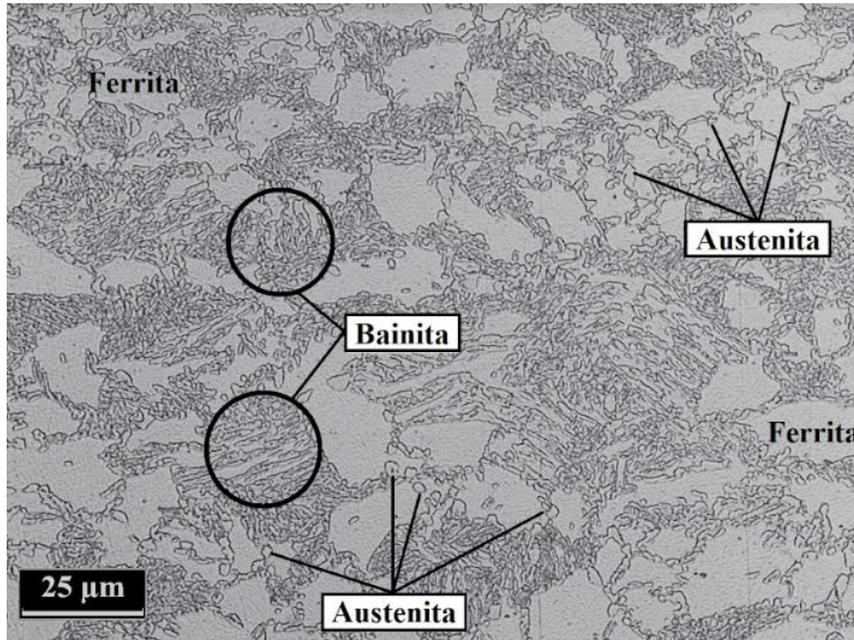


Figura 44. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita ($\alpha\beta$) y austenita (γ) en la muestra 02

En la figura 45 se muestra la microestructura del acero TRIP CQ-04, en la cual se puede observar zonas claras, las cuales están rodeadas de pequeños granos y zonas oscuras. Las zonas claras corresponden a la Ferrita (fase suave) mientras que las zonas oscuras y alargadas corresponden a la bainita, los pequeños granos podrían tratarse de austenita retenida y/o martensita, se requiere realizar difracción de rayos X para identificar la fase correspondiente. La microestructura de esta composición, las zonas claras (ferrita) son las de menor tamaño en comparación de las composiciones CQ-00 y CQ-02.

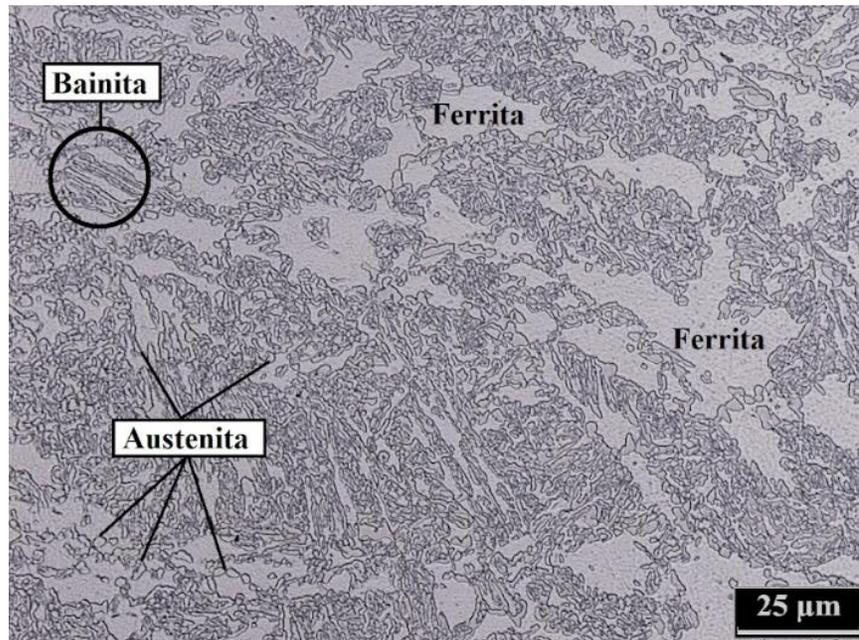


Figura 45. Imagen de la microestructura donde podemos observar la ferrita (α), bainita (ab) y austenita (γ) en la muestra 04

Difracción de rayos x (DRX)

Mediante el análisis de rayos x se obtuvo la medición de austenita retenida utilizando un patrón de rayos x, ya que el acero contiene fases cristalinas como ferrita, martensita y austenita, se produce un patrón de difracción de rayos x único para cada fase cristalina cuando las muestras de los aceros se inciden con el equipo de rayos x.

En las figuras 46, 47 y 48 se muestran los difractogramas obtenidos de las tres composiciones químicas (CQ-00, CQ-02 y CQ-04), en los que se observan similitudes entre los patrones de difracción, los picos identificados indican la presencia de austenita retenida en la microestructura.

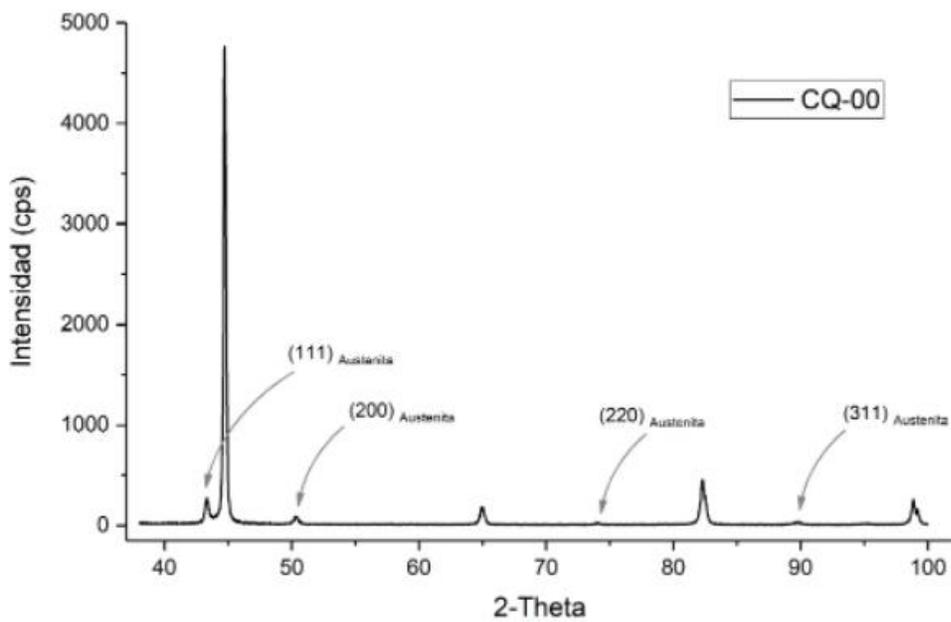


Figura 46. Difractograma de rayos x de la muestra 00

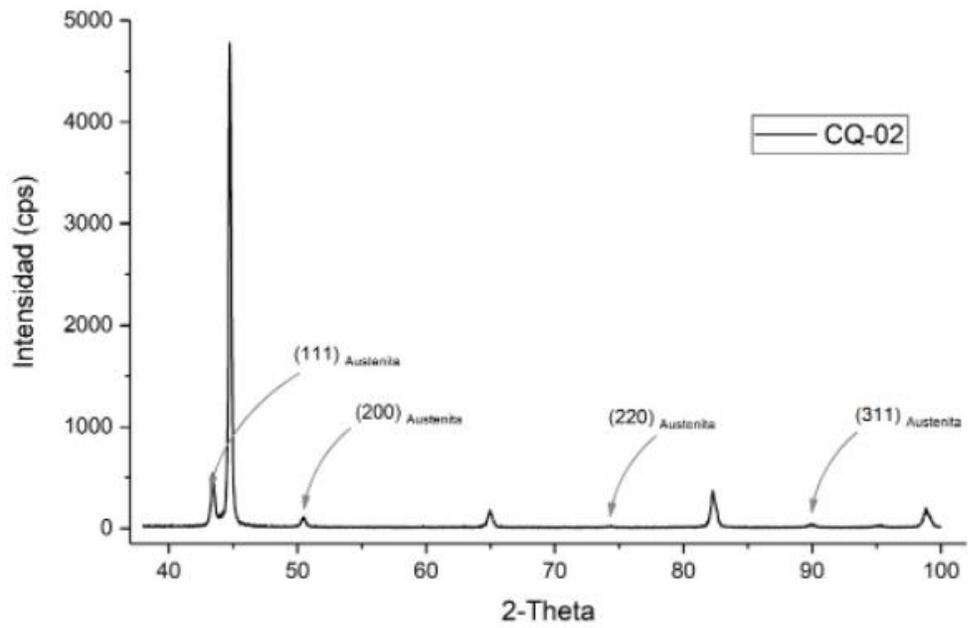


Figura 47. Difractograma de rayos x de la muestra 02

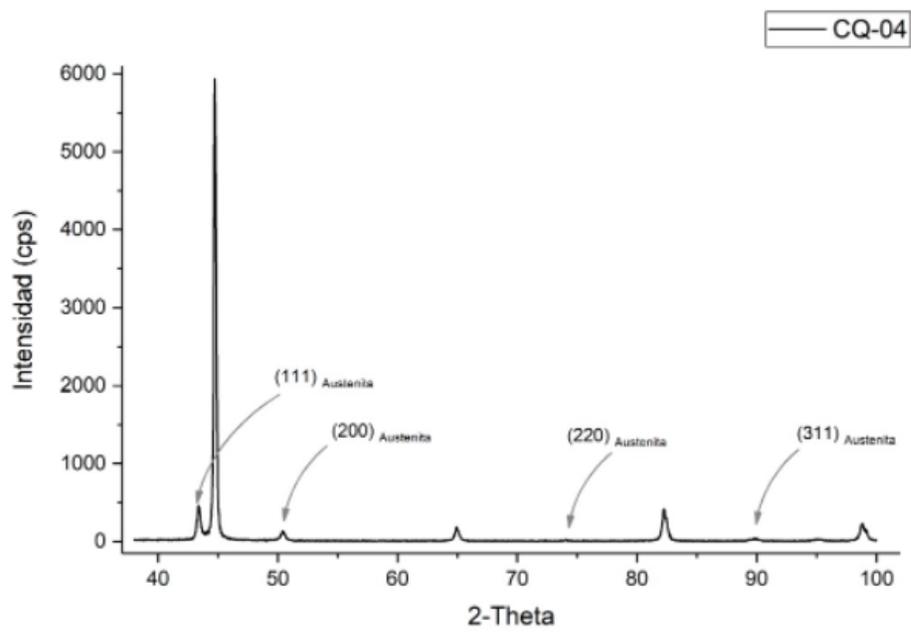


Figura 48. Difractograma de rayos x de la muestra 04

En las tres muestras analizadas por ambas técnicas (microscopía óptica y DRX) podemos observar que la microestructura está compuesta de tres fases, las cuales son: ferrita, bainita y austenita retenida, por lo que podemos determinar que las tres composiciones químicas recibidas, cumplen con la característica microestructural de un acero TRIP perteneciente a la familia de aceros AHSS. para determinar que también se cumple con las características mecánicas de un acero de este tipo, se requieren ensayos de tensión e impacto.

Ensayos de tensión e impacto

En la figura 49 se muestran las curvas promedio de esfuerzo - deformación obtenidas del ensayo de tensión para cada una de las composiciones químicas. En la cual se puede observar que el acero CQ-00 alcanzó un esfuerzo máximo de 660 MPa con un porcentaje de elongación del 37%, mientras que el esfuerzo máximo y porcentaje de elongación para el acero CQ-02 fue de 775 MPa y 34.5% respectivamente y para el acero CQ-04 el esfuerzo máximo a tensión alcanzado fue de 740 MPa y 42% de elongación.

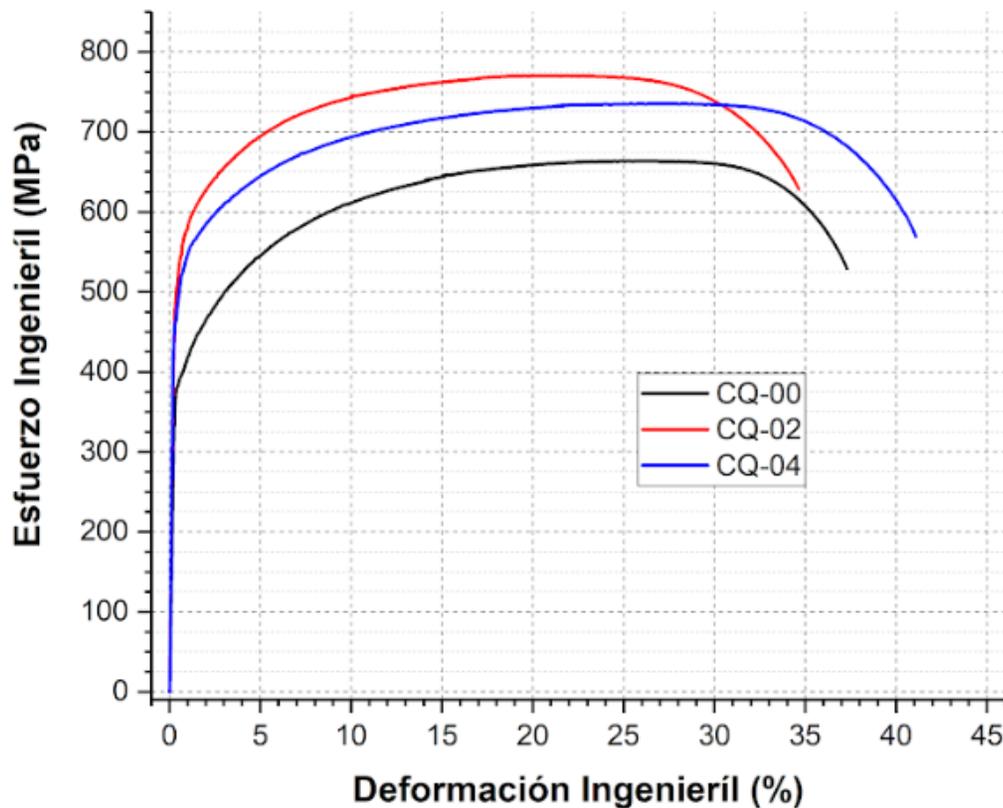


Figura 49. Gráfica esfuerzo-deformación ingenieril obtenida del ensayo de tensión

De acuerdo con los resultados del ensayo de tensión, los tres aceros (CQ-00, CQ-02 y CQ-04) cumplen con las propiedades mecánicas (esfuerzo - deformación) que caracterizan a un acero TRIP, por lo que, las tres composiciones químicas y el

tratamiento térmico de los aceros ensayados, han generado un acero con características de un acero TRIP.

En la figura 50 se muestran los resultados del ensayo de impacto Charpy, como se puede observar el acero CQ-02 fue el que menos energía absorbió del impacto (48 Joules), seguido del acero CQ-00 con 96 Joules y el acero CQ-04 fue el que absorbió mayor energía del impacto con 102 Joules.

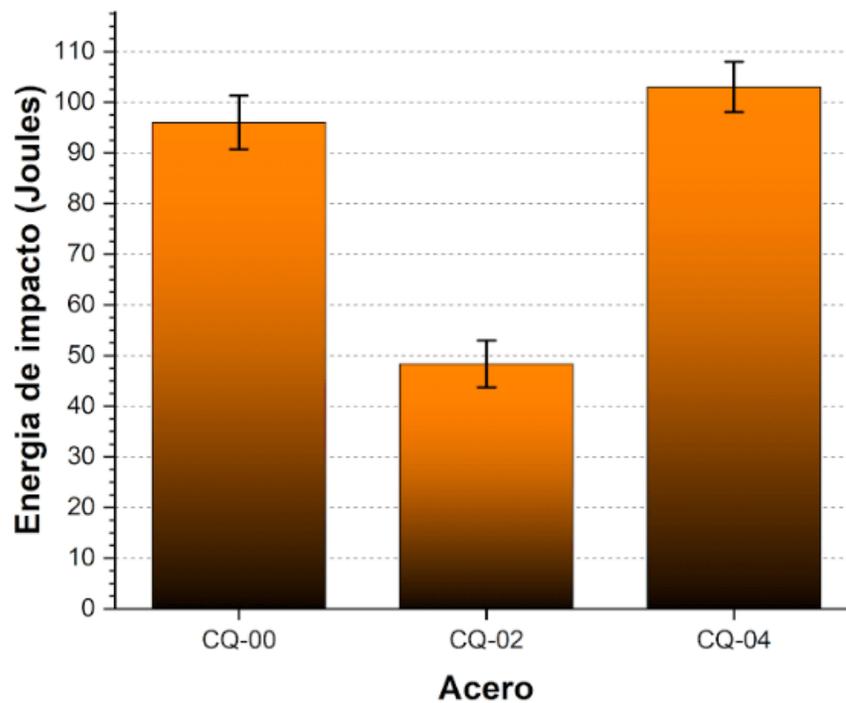


Figura 50. Gráfica de energía de impacto en el acero

En la figura 51 se muestran las zonas de la fractura de los tres aceros TRIP, en la cual se puede observar como el área gris (conocida como área de cortante) que se encuentra dentro del rectángulo es diferente para cada una de las muestras, esta área de cortante es inversamente proporcional a la energía de impacto, entre mayor es el área de cortante, menor es la energía de impacto que absorbe el material. y como se puede observar el acero CQ-02 es la que muestra una mayor área de cortante, por lo que, absorbió menor energía de impacto. Siendo el acero CQ-04 el

que menor área de cortante muestra y por lo tanto es el que absorbe mayor energía en el impacto.

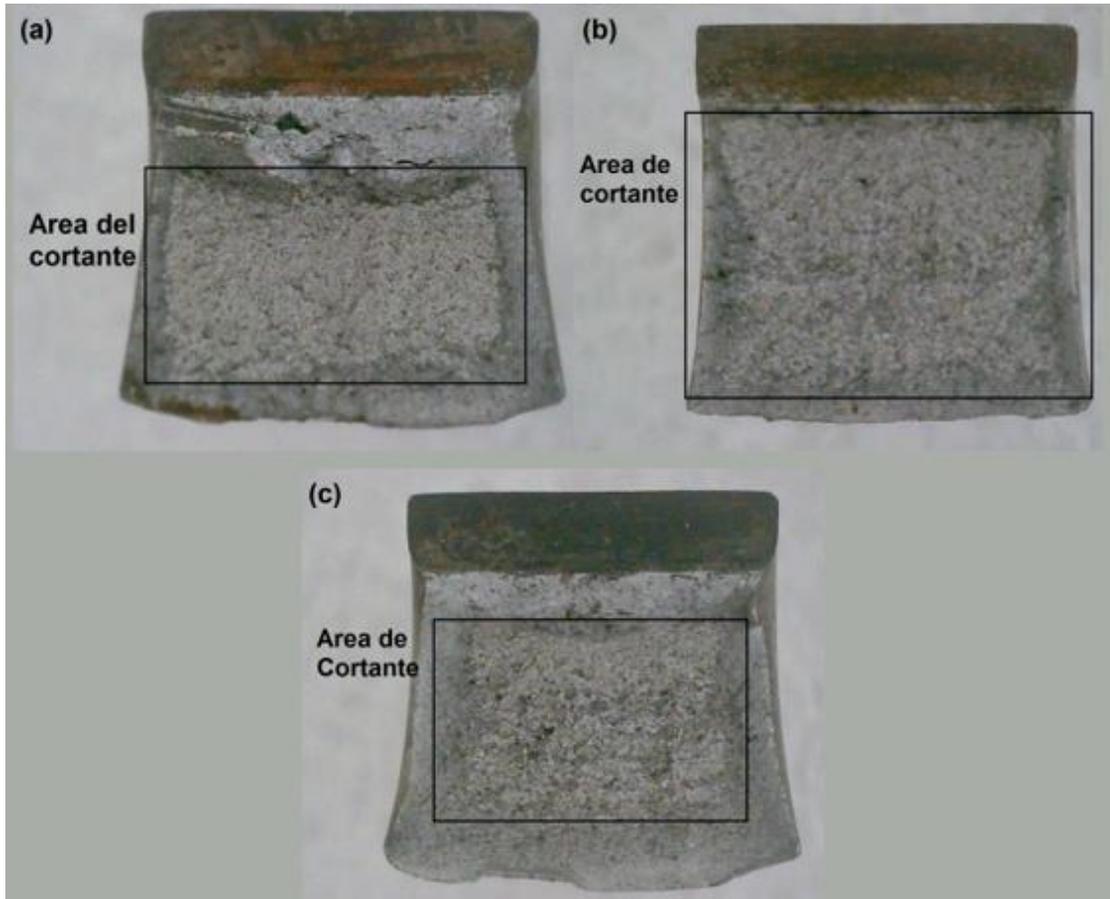


Figura 51. Zona de fractura de los tres aceros TRIP a) CQ-00, b) CQ-02 y c) CQ-04

Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza superficial se realizaron en la sección normal y en la sección transversal en los tres aceros, en la figura 52 se observan las zonas donde se realizaron los ensayos de dureza.

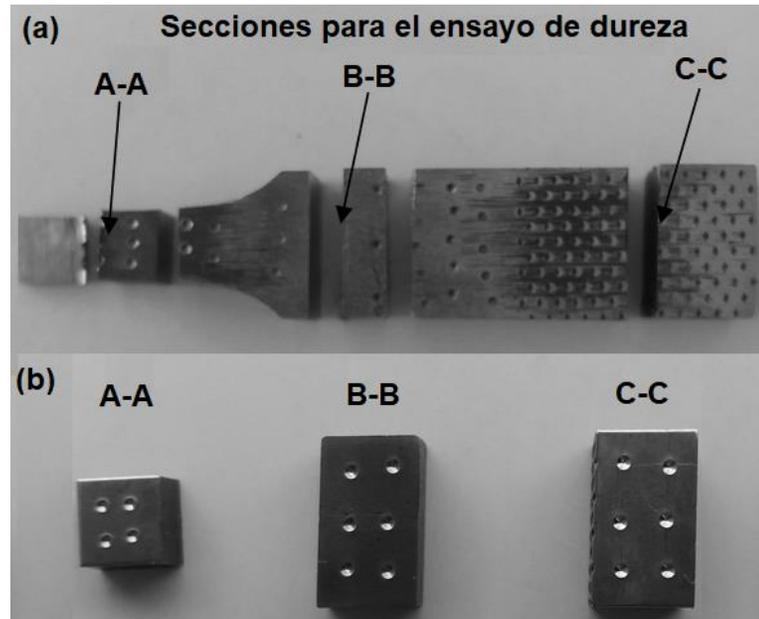


Figura 52. Ensayo de dureza superficial a) zona normal, b) zona transversal de las muestras

En la figura 53 se presenta el resultado de dureza de las tres muestras (CQ-00, CQ-02 y CQ-04) las mediciones se realizaron en tres zonas (zona de estricción o ruptura, cambio de sección y hombro de la probeta) de la sección normal y de la sección transversal, como se observa, en la zona de estricción existe una mayor dureza (34 HRC) por lo tanto podemos decir que es la zona donde hay mayor absorción de energía por deformación, es por esto, que a menor deformación se tiene como resultado una menor dureza, como se observa en la figura 51 en la sección c-c la dureza alcanza un valor de 22 HRC (dureza Rockwell C). Este cambio en la dureza se puede atribuir a la transformación de la austenita retenida en martensita durante la deformación plástica.

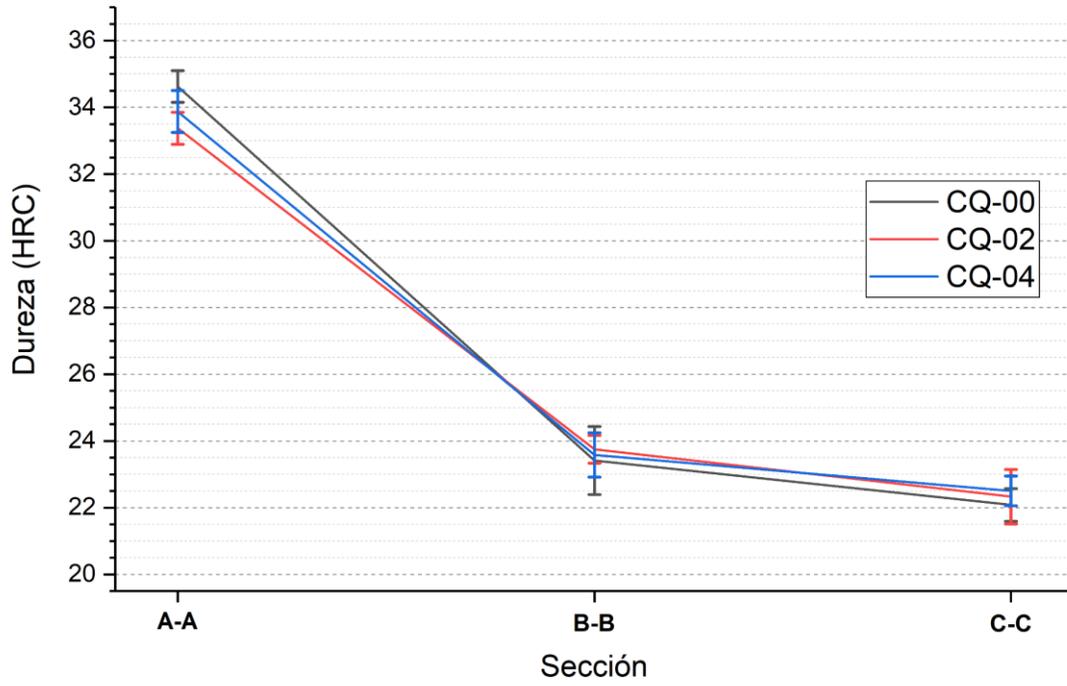


Figura 53. Resultados de los ensayos de dureza (HRC, Rockwell C) en las tres muestras de aceros TRIP

Conclusiones

Durante la elaboración del proyecto se identificó la importancia que tienen los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), en especial los aceros TRIP y la complejidad que se tiene en el ámbito metalúrgico para su obtención. La importancia de someter las probetas a los diferentes porcentajes de deformación por tensión se realizaron con la finalidad de enriquecer las investigaciones acerca de estos aceros y analizar el consumo de austenita retenida durante un ensayo de tracción con lo que pudimos observar que:

- El diseño del tratamiento térmico para las tres composiciones químicas fue el adecuado, ya que las condiciones de tiempo y temperatura en el recocido intercrítico y tratamiento isotérmico utilizado para la fabricación del acero, generó una microestructura compuesta por ferrita, bainita y austenita retenida, la cual es característica de un acero TRIP.
- La microscopía óptica es una técnica donde podemos observar las fases del acero como pueden ser ferrita, bainita y austenita retenida, sin embargo, debido al tamaño de grano obtenido en los tres aceros, es complejo diferenciar estas fases con precisión, por tal razón, se requieren de técnicas complementarias como la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos x, las cuales facilitan la identificación de cada una de las fases.
- De los tres aceros TRIP fabricados, la composición química CQ-04 es la que ofrece la mejor relación entre resistencia y ductilidad, ya que con esta, se alcanzó una resistencia máxima a la tensión de 725 MPa, que si bien es cierto, no fue la máxima resistencia alcanzada de las tres composiciones (CQ-00=650 MPa, CQ-02=750 MPa), si es la que alcanzó tanto el mayor porcentaje de elongación (CQ-00=37%, CQ-02=35% y **CQ-04=42%**), así como, la mayor absorción de energía de impacto (CQ-00=95 Joules, CQ-02=48 Joules y **CQ-04=103 Joules**).

Referencias

- A., D., G., D., R., V., & A., S. (2006). Microstructures and properties of transformation induced plasticity steels. *La metallurgia italiana*, 1-5.
- ASTM International. (2000). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. North America: ASTM International.
- ASTM International. (2013). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. North America: ASTM International.
- CZ. (2022). *CZ Revista Técnica de Centro Zaragoza*. Obtenido de CZ Web site: <https://revistacentrozaragoza.com/la-evolucion-del-acero-en-la-fabricacion-de-carrocerias/>
- Del Castillo Rodríguez, F. D. (2009). Los nuevos aceros para la industria automotriz. *Los nuevos aceros para la industria automotriz* (pág. 8). México: Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán.
- E. Shallman, R., & J. Bishop, R. (2002). *Modern Physical metallurgy & materials engineering*. England: Elsevier Science.
- Fonstein, N. (2015). *Advanced High Strength Sheet Steels*. Chicago: Springer.
- Gonzalez Duarte, M. Á. (2011). Introducción a los aceros con comportamiento TRIP. M. Á. Gonzalez Duarte, *Introducción a los aceros con comportamiento TRIP* (pág. 39). Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Ipohorski, M., & B. Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido y Difracción de rayos x. *Ciencia e investigación*, 1-11.
- J. McEvily, A. (2013). *Metal failures, mechanisms, analysis, prevention*. Canada: John Wiley & Sons.
- M. Tamarelli, C. (2011). *AHSS 101 The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications*. Michigan: Steel Market Development Institute.
- Mallen, Z., R., T., & S., D. (2008). *Recent Applications of High Strength Steels in North American Honda Production*. North America: Honda R&D Americas Inc.

- O., M., Y., S., & H., T. (1987). Enhancement of elongation by retained austenite in intercritical annealed 0.4C-1 .5Si-0.8Mn steel. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 570-579.
- P. J., J. (2004). Transformation-induced plasticity for high strength formable steels. *Solid State & Material Science*, 1-7. doi:10.1016/j.cossms.2004.09.006
- P., V., L., S., Y., H., K., V., & J., G. (2012). Aceros avanzados de alta resistencia en la industria automovilística. *Revista de metalurgia*, 1-14.
- S., Z., J., O., & W., B. (2004). A study of microstructure, transformation mechanisms. *Acta Materialia*, 2765–2778.
- V. F., Z., E. R., P., & D., F. (1967). "The enhancement of ductility on High-Strength Steels Trans. ASM, 252-259.
- Verliden, B. (2007). Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials. s.l. : Robert W. Cahn FRS, Department of Materials Science and Metallurgy. B. Veriden, *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials. s.l. : Robert W. Cahn FRS, Department of Materials Science and Metallurgy* (págs. 420-421). England: University of Cambridge.
- WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/1stgen-ahss/martensite/>
- WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/>
- WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>
- WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://www.worldautosteel.org/>

WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>

WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>

WorldAutoSteel. (2022). *Automotive of the World Steel Assosiation*. Obtenido de WorldAutoSteel Web site: WorldAutoSteel Web site: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ferrite-bainite-steel/>

Anexos

Anexo 1: Ensayo de tracción bajo la Norma ASTM E8

La norma ASTM E8 / E8M; indica los métodos de ensayo que cubren las pruebas de tensión de materiales metálicos en cualquier forma a temperatura ambiente, específicamente, los métodos para determinar el límite de elasticidad, la elongación límite de elasticidad, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área. A temperatura ambiente se debe trabajar con una temperatura de 10 a 38 °C (50 a 100 ° F) a menos que se especifique lo contrario. Los valores indicados en unidades SI (Sistema Internacional) deben estar separados de las unidades en sistema inglés (pulgadas/libra). Los valores indicados en cada sistema son equivalentes, pero no exactas; por lo tanto, cada sistema debe ser utilizado independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede resultar en la no conformidad con el estándar. Los especímenes tamaño-prueba deberán ser de tamaño completo o mecanizado, como se describe en las especificaciones del producto para el material que se está siendo probado. En la figura 52 se muestran las dimensiones y geometría de probetas de ensayo de tracción que se deben utilizar. (ASTM International, 2013)

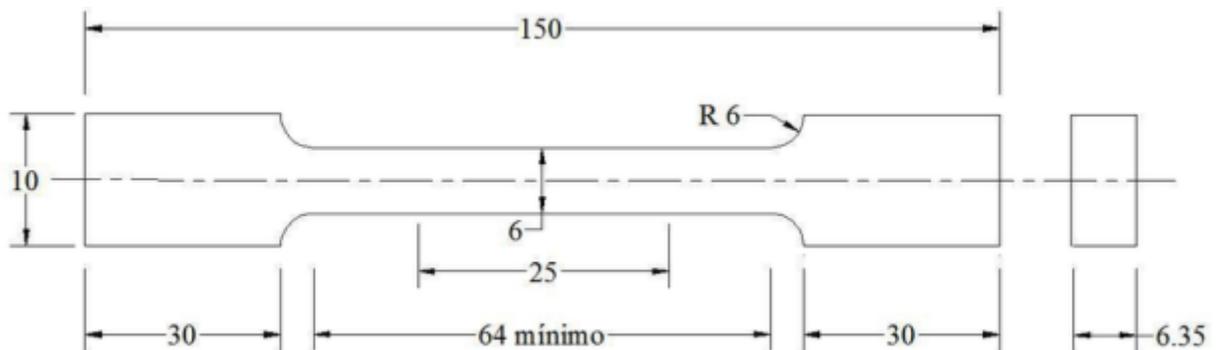


Figura 54. Probetas para el ensayo de tracción uniaxial de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M unidades en mm (ASTM International, 2013)