

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**CARACTERIZACIÓN DE ACEROS AVANZADOS Y ESTUDIO
DE SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD**

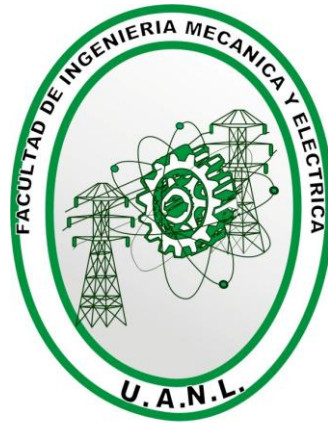
POR

DANIELA MARÍA DEL ROSARIO TÉLLEZ LÓPEZ

TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., NOVIEMBRE DEL 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**CARACTERIZACIÓN DE ACEROS AVANZADOS Y ESTUDIO
DE SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD**

POR

DANIELA MARÍA DEL ROSARIO TÉLLEZ LÓPEZ

TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., NOVIEMBRE DEL 2011

HOJA DE REVISIÓN

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Caracterización de aceros avanzados y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad”, realizada por el alumno Daniela María del Rosario Téllez López con número de matrícula 1190188, sea aceptada como opción para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

Asesor
Dra. Patricia Zambrano Robledo

Revisor
Dra. Martha Guerrero Mata

Revisor
Dr. Joaquín del Prado Villasana

Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de la División de Estudios de Postgrado.

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo de este proyecto primeramente a Dios por ser la base de cada meta que he emprendido y por ser siempre una guía en mi camino. A todos los que creyeron en mí, a toda la gente que me apoyo, a mis amigos y familiares y a esta institución que me ha formado.

A mis padres, Floriza y Jesús, por la formación que me dieron, por ser ejemplo día con día de fortaleza, de manera muy especial a mi papá que desde el cielo se que está orgulloso deseando lo mejor para mí y en su memoria he logrado realizar ese postgrado, muchas gracias por fomentar en mí el buscar más cada día; siempre estaré agradecida con ellos eternamente.

A mi hermano Jesús Mariano por ser parte fundamental de mi vida y por estar siempre a mi lado.

A mi novio Fernando Sierra, por ser alguien muy especial en mi vida y por demostrarme que en todo momento cuento con él. Por su apoyo, y comprensión.

A mis abuelos, Jesús, Modesta, Reynaldo y Luz por su apoyo y cariño; por ser siempre un ejemplo de unidad. Gracias por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor.

A todos mis amigos, sin duda ellos son parte de lo que hoy soy y agradezco su amor y apoyo incondicional todos estos años. Gracias por estar siempre a mi lado ayudándome y dándome aliento para la culminación de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de la autora y su directora de tesis, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Primero y antes que nada, dar gracias a dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por siempre mostrarme el camino a seguir, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia, les agradezco su apoyo, su guía y su confianza en la realización de mis sueños, por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr los objetivos y que en la vida no hay límites, que lo que me proponga lo puedo lograr y que solo depende de mí.

A mi novio y amigo Fernando Sierra por ser mi motivación, por sus palabras de aliento en todo momento que lo necesité, por su amor y apoyo incondicional en la realización de mis anhelos.

Se agradece al CONACYT por el apoyo económico brindado durante los estudios de maestría.

A la UANL y a la FIME por ser la institución que me permitió obtener mis estudios profesionales, así como los de maestría. Gracias a todos los maestros que contribuyeron realmente en mi formación.

Se agradece al Dr. Joaquín Del Prado y al Ing. Rodrigo Berlanga por colaborar de manera conjunta con el autor y con los miembros de la FIME-UANL, permitiendo hacer uso de las instalaciones y equipos de la empresa METALSA para lograr que esta investigación se llevara a cabo. Gracias por su colaboración en la experimentación y adquisición de datos.

Al personal académico y de investigación del postgrado de FIME, por su constante asesoría. En especial a la Dra. Patricia Zambrano por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, por todo el tiempo que me ha dedicado, por acompañarme de la mano durante el desarrollo de mi tesis, por brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

A la Dra. Martha Guerrero por todo el tiempo que me ha dedicado, por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por su apoyo y colaboración para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Rafael Colás por esa forma tan humana de compartir el conocimiento, por estar ahí siempre dispuesto a aclarar mis dudas, y su respaldo en la realización de esta tesis.

A la Dra. Adriana Salas, por su constante apoyo y tutoría en esta tesis, por siempre aportarme ideas y recomendaciones.

Al equipo de simulación, en especial a Oscar Zapata por su apoyo y colaboración en la simulación realizada en este trabajo.

A Sergio Leal, por tu valiosa amistad. Gracias por cada uno de los momentos que compartimos, por tu tiempo, por compartir mis mismas experiencias y ponernos el hombro cada vez que se necesito, por tu apoyo y ánimo.

A mis compañeros y amigos con los cuales he compartido esta etapa de mi vida e incontables horas de trabajo, gracias por los buenos y malos momentos, por aguantarme y escucharme, gracias por su amistad incondicional.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo mas profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, animo y sobre todo cariño y amistad.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Resumen	X
Capítulo 1 – Introducción	1
Capítulo 2 – Antecedentes	8
Capítulo 3 – Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS)	13
3.1 – Descripción general	13
3.2 – Clasificación de los AHSS	14
3.3 – Aceros doble fase (DP)	17
3.4 – Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP)	23
3.5 – Aceros martensíticos (M)	29
3.6 – Aceros de fase compleja (CP)	31
3.7 – Aceros ferríticos-bainíticos (FB)	32
3.8 – Aceros plasticidad inducida por maclaje (TWIN)	33
3.9 – Conformabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia	34
Capítulo 4 – Experimentación	37
4.1 – Aceros a estudiar	37
4.2 – Preparación de muestras	39
4.3 – Descripción de pruebas	41
4.3.1 – Análisis químico	41
4.3.2 – Análisis metalográfico	42
4.3.3 – Ensayos de dureza y microdureza	45
4.3.4 – Ensayo de tensión	49
4.3.5 – Análisis por simulación	53

Capítulo 5 – Resultados	58
5.1 – Análisis químico	58
5.2 – Análisis metalográfico	60
5.3 – Ensayos de dureza y microdureza	63
5.4 – Ensayo de tensión	65
5.5 – Análisis por simulación	76
5.6 – Selección del material de reemplazo	84
Capítulo 6 – Discusiones	86
Capítulo 7 – Conclusiones	92
Capítulo 8 – Recomendaciones	94
Referencias Bibliográficas	96
Lista de figuras	101
Lista de tablas	106
Lista de ecuaciones	108
Apéndice A	109
Apéndice B	110

RESUMEN

Los ingenieros que forman parte de la industria automotriz ha estado en la búsqueda de materiales que le permitan el reducir el peso de sus vehículos con el objetivo de disminuir el consumo de combustible, además de cumplir con las nuevas reglamentaciones de seguridad en las pruebas de impacto y al mismo tiempo buscan reducir los costos así como el impacto ambiental. Por eso la necesidad de contar con materiales mas resistentes y ligeros que contengan las mismas propiedades mecánicas o superiores que los tradicionalmente utilizados. El desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés) ha cumplido con esta expectativa, sin embargo al ser materiales relativamente nuevos con estructuras complejas, presentan un gran reto para la investigación y aplicación.

Los AHSS son ideales para aplicaciones donde se requiere reducir el peso debido a que presentan altas propiedades mecánicas que permiten reducir el espesor de piezas estructurales de un vehículo. Debido a esto se llevó a cabo un estudio de caracterización de dos aceros avanzados de alta resistencia (DP600 Y PM590) con el objetivo de determinar sus propiedades mecánicas y de conformabilidad, para evaluar estos aceros como posibles reemplazos en partes estructurales de un automóvil.

Durante la investigación experimental de este proyecto, se realizó análisis químico a ambos aceros, posteriormente se obtuvo la microestructura y tamaño de grano para cada acero mediante microscopía óptica, se realizaron ensayos de dureza Rockwell y Vickers para determinar la dureza y microdureza, posteriormente se llevaron a cabo ensayos de tensión a distintas velocidades de cabezal (10, 100 y 1000 mm/min) para determinar las propiedades mecánicas en diferentes velocidades de deformación, así como la relación de deformación plástica promedio (R) para definir el grado de conformabilidad y anisotropía plástica de los aceros estudiados, para

finalizar se simuló el proceso de compresión de una pieza tubular utilizada en la estructura de automóviles con el propósito de evaluar el comportamiento de la pieza tubular durante un impacto frontal.

En las fotomicrografías se obtuvieron tamaños de grano homogéneos en cada uno de los aceros, los valores mas altos de dureza y microdureza los presento el acero PM590, las mejores propiedades mecánicas y relación de deformación plástica promedio se obtuvieron para el acero DP600. Durante el análisis de simulación de compresión de la pieza tubular el mejor comportamiento se observo en el acero DP600.

El acero DP600 posee las propiedades mecánicas más elevadas debido a su composición química (contiene manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel que se añaden al acero para incrementar su dureza) y a la alta tasa de consolidación (da a los aceros fuerzas máximas de tensión más altas que las de los aceros convencionales) característica de este tipo de aceros de alta resistencia. El valor de R muestra el grado de conformabilidad en un proceso de embutido o estampado profundo, por lo tanto el acero DP600 presenta la conformabilidad mas elevada. El acero DP600 es el que durante la simulación de compresión obtuvo una mayor resistencia mecánica y mayor reducción de su longitud original.

Finalmente el acero DP600 presentó mayor resistencia mecánica, y un mejor comportamiento al ser sometido a un impacto, por lo tanto es el acero más adecuado para reemplazar al acero HSLA con el que actualmente se manufactura la pieza tubular. El acero DP600 presentó un esfuerzo a compresión mayor que el obtenido para el acero HSLA, lo que permitiría disminuir el espesor de la pieza tubular al fabricarla con acero DP600 para igualar el esfuerzo que presenta la pieza fabricada con acero HSLA. Esto a su vez llevaría a una reducción en peso de partes estructurales del chasis de un automóvil. Es importante mencionar que otras propiedades del material tienen que ser evaluadas como fatiga, resistencia a la corrosión, costos, entre otras, para poder cumplir satisfactoriamente las especificaciones del vehículo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de materiales desarrolla formas de utilización de los materiales para beneficio de la humanidad. Este ha sido un factor clave en la historia del hombre: la edad de piedra de la humanidad; corresponde a la utilización de rocas, huesos y palos como herramientas, la edad de los metales corresponde al descubrimiento de estos y su aplicación en el combate, la edad media que se caracteriza por los experimentos de alquimia que permitieron el descubrimiento de otros materiales, la era industrial se caracterizó por el uso del acero, y por último la era actual en la que ya no se habla de un solo material sino de varios. En la actualidad se ha reconocido que existe una relación entre la microestructura, las propiedades y el procesamiento de los materiales, lo cual permite controlar este último para obtener las propiedades y microestructura que se desean según la aplicación específica del material [1].

Durante los últimos años, se están promoviendo medidas más respetuosas con el medio ambiente. Las políticas nacionales e internacionales están realizando esfuerzos económicos tanto a nivel de investigación como apoyo a empresas para que se consigan avances tecnológicos más respetuosos con el entorno [2].

El sector automovilístico no se encuentra al margen de estas políticas, y dado que es un sector altamente contaminante, está proponiendo diferentes líneas estratégicas, que tienen como finalidad la reducción del consumo de los combustibles fósiles. La reducción del combustible se puede llevar a cabo incrementando el rendimiento del motor o reduciendo el peso del vehículo, lo

cual se puede lograr disminuyendo el espesor de sus componentes, mediante el uso de nuevos materiales más ligeros que tengan las mismas propiedades mecánicas o superiores. Una reducción de 1% en el peso del vehículo, genera una reducción del consumo de combustible del 0.5% [2,3].

Los fabricantes de automóviles buscan mejorar continuamente la seguridad y optimizar el consumo de combustible de sus vehículos, mientras que al mismo tiempo buscan reducir los costos y el impacto ambiental, esto sin lugar a dudas afecta considerablemente el diseño del vehículo, y la selección de las partes para el mismo. Para lograr estas metas es necesario la combinación de materiales de alta tecnología, de diseños innovadores, y procesos de manufactura avanzados [4].

La industria automotriz requiere de materiales fácilmente formables, soldables, reparables y resistentes a la corrosión por medio de recubrimientos. Para lograr esto, fueron desarrollados los aceros avanzados de alta resistencia, estos materiales incrementan la eficiencia de los aceros convencionales y a su vez permiten el diseño y la manufactura de estructuras para vehículos más eficientes [5].

Los aceros avanzados de alta resistencia pueden ser utilizados para reducir peso y el costo en la fabricación de vehículos así como para mejorar la seguridad, el diseño y la manufactura de partes estructurales del chasis de un automóvil debido a sus propiedades mecánicas, tales como alta resistencia, excelente conformabilidad, y alta capacidad de absorción de energía, lo que mejora la seguridad de los pasajeros [5, 6].

Dentro del grupo de aceros avanzados de alta resistencia se encuentran los aceros de doble fase, los aceros de plasticidad inducida por transformación, los cuales presentan características de formabilidad adecuadas para el proceso de conformado, lo que ayuda a diseños más complejos en las piezas. Otros como los aceros de fase compleja y los aceros martensíticos que muestran alta resistencia a la tensión, manteniendo

una alta capacidad de absorción de energía, esto aumenta la seguridad de los pasajeros en caso de una colisión [7].

La historia de los aceros avanzados de alta resistencia para aplicaciones estructurales de componentes de automóvil se muestra en la figura 3.1, donde se indica aproximadamente la fecha de aparición en el mercado europeo del primer grado industrial de cada acero. Se aprecia que el desarrollo de aceros de alta resistencia es previo a 1980. Los aceros DP fueron los primeros aceros AHSS en desarrollarse, pero su uso industrial, al igual que los TRIP, no empezó hasta 1995, impulsado por el consorcio ULSAB (acrónimo del inglés 'Ultra Light Steel Automotive Body', es decir chasis ultraligero de acero). El objetivo del consorcio ULSAB era fabricar chasis ligeros de acero, reduciendo el espesor de sus componentes mediante el desarrollo de aceros de mayor resistencia mecánica. Los resultados del proyecto ULSAB desembocaron en la implementación industrial de estos aceros a mediados de los años 90, tal como ilustra la figura 3.1.

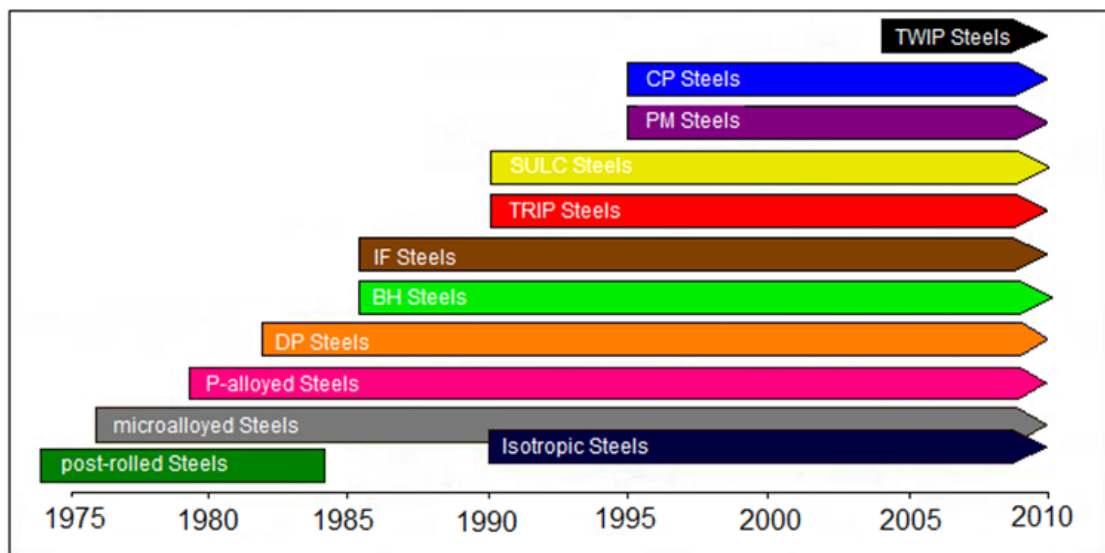


Figura 1.1 Evolución histórica del desarrollo de aceros de alta resistencia [5].

En 1995 no existían aplicaciones automotrices de los aceros avanzados de alta resistencia, sin embargo para el año 2004 se incrementó su aplicación en la industria automotriz en un 12%, un 47% los aceros de alta resistencia HSS y un 41% los aceros convencionales. Se espera que para el año 2015 la aplicación de los aceros AHSS se incremente hasta un 50% [8].

La evolución de los aceros AHSS usados en la carrocería de los autos se muestra en la siguiente figura 1.1.

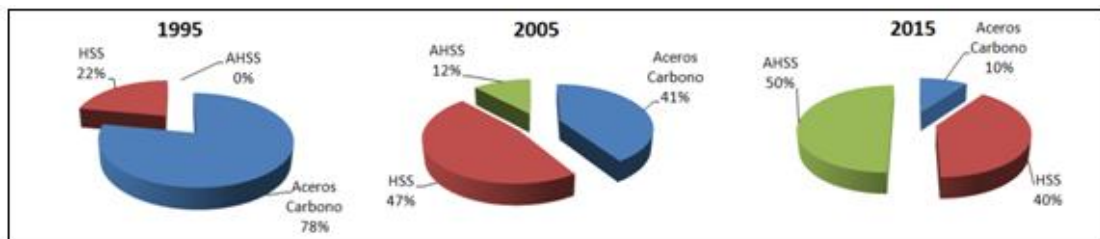


Figura 1.2 Gráfica de la evolución de los AHSS usados en la carrocería de los autos [8].

Actualmente, diversas empresas automotrices han incrementado el uso de aceros avanzados de alta resistencia en sus diseños. En la figura 1.2 se muestra como las principales compañías automotrices incluyen el uso de este tipo de aceros en la fabricación de sus vehículos [9].

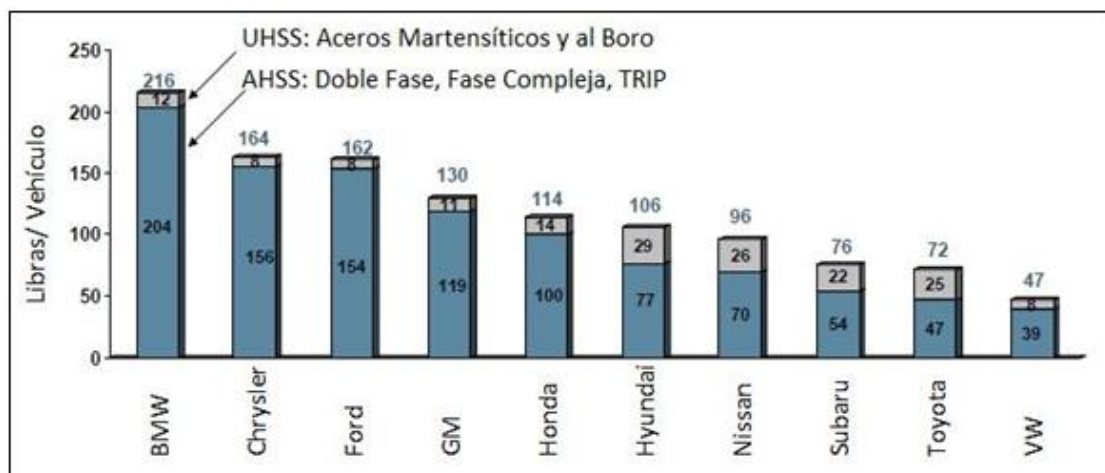


Figura 1.3 Contenido en peso por vehículo de aceros AHSS [9].

Los aceros avanzados AHSS del tipo martensíticos se utilizan principalmente para la fabricación de partes estructurales de la carrocería,

defensas y puertas del automóvil. En la figura 1.3 se muestran las diferentes aplicaciones de los AHSS en las partes de un automóvil [9].

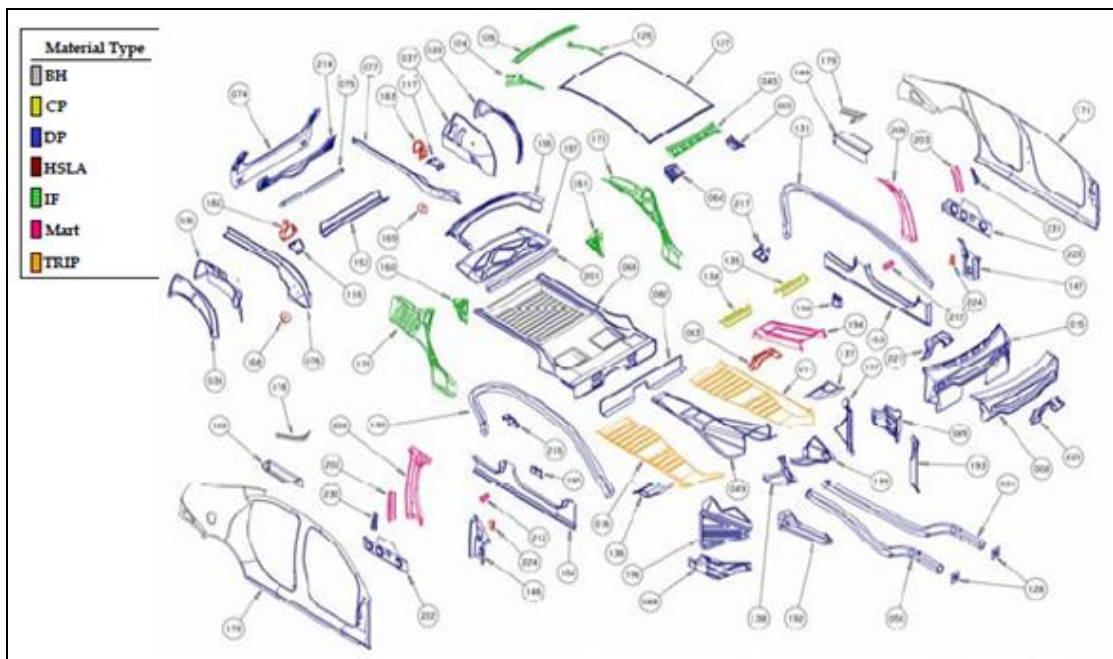


Figura 1.4 Tipos de aceros seleccionados para partes individuales de un automóvil USLAB-AVC International Iron and Steel Institute 2002 [9].

Usualmente, cuando se emplean aceros de alta resistencia para sustituir a los aceros convencionales utilizados en la manufactura de estructuras y paneles automotrices, la reducción en formabilidad es frecuentemente una de las consecuencias no deseadas. Para evitar esto, aceros microestructuralmente avanzados han sido diseñados para combinar alta formabilidad y elevada resistencia mecánica [10].

Los aceros automotrices han sido clasificados de la siguiente manera, la primera por medio de designaciones metalúrgicas [10]:

- Aceros de baja resistencia: aceros de bajo carbono, aceros libres de intersticiales, con contenidos de carbono muy bajos, menores a 0.010% y aceros suaves.
- Aceros convencionales de alta resistencia: tales como aceros de alto carbono, al carbono-manganeso (C-Mn), isotrópicos, endurecibles por tratamiento térmico y aceros de alta resistencia baja aleación (HSLA).
- Aceros avanzados de alta resistencia: aceros de doble fase (DP por sus siglas en ingles), aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP por sus siglas en ingles), aceros de fase compleja (DP), aceros martensíticos (MART por sus siglas en ingles), aceros ferríticos-bainíticos (FB por sus siglas en ingles) y aceros de plasticidad inducida por maclaje (TWIN por sus siglas en ingles).

Otra clasificación se basa en sus propiedades mecánicas, específicamente en relación con su esfuerzo último de tensión [10]:

- Aceros de baja resistencia, menos de 270MPa
- Aceros de alta resistencia (HSS), 270-700 MPA
- Aceros de ultra alta resistencia (UHSS), mayor a 700 Mpa

Este trabajo está enfocado al estudio de las propiedades mecánicas de los aceros avanzados laminados en caliente DP600 y PM590 con el objetivo principal de determinar cual de los aceros presenta la mejor opción para aplicaciones en partes estratégicas de la estructura de un vehículo con la finalidad de reducir su peso y por consiguiente ahorro en consumo de combustible y esto a su vez tenga un impacto ambiental benéfico sin comprometer la seguridad de los pasajeros. Por lo tanto se ha decidido realizar una caracterización de dichos aceros trabajando en conjunto con la empresa Metalsa S.A. de C.V.

Debido a esto se pretende determinar el acero con mejores propiedades mecánicas y de conformabilidad para la sustitución de aceros convencionales en partes estratégicas de la estructura de un vehículo, mediante el estudio y caracterización de los aceros avanzados.

Se puede proyectar que con la implementación de AHSS en partes estratégicas del chasis de un automóvil se puede alcanzar una reducción de peso de hasta un 25%, sin poner en riesgo las condiciones de seguridad de los pasajeros [15, 16, 17, 19, 20, 21].

El sector automovilístico es altamente contaminante, es por esto que actualmente en la industria automotriz existen fuertes necesidades de ajustar sus productos para cumplir con regulaciones federales referentes al consumo de energéticos, control de emisiones de dióxido de carbono e incremento de seguridad.

Estas regulaciones coinciden con una serie de compromisos de las compañías hacia un mercado que les exigen bajo consumo de combustible (mayor eficiencia) mediante la reducción de peso de la estructura de un automóvil, debido a estas necesidades el sector automotriz se encuentran en una constante búsqueda de materiales de mayor resistencia.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En los últimos años en el sector automovilístico se ha producido un avance muy importante en el desarrollo de materiales ligeros y de alta resistencia que cumplan las exigencias de los nuevos modelos: más seguridad en las pruebas de impacto, alta capacidad de absorción de energía, elevada resistencia mecánica, así como alta resistencia a la fatiga, y a la corrosión, Y excelentes propiedades de conformado. Aunado a esto la industria automotriz busca disminuir el peso del vehículo para conseguir una reducción del consumo de combustible y en consecuencia esto llevaría a disminuir las emisiones de CO₂ y esto a su vez contribuye como ventaja benéfica al medio ambiente. Para cumplir estas exigencias se están incorporando materiales ligeros de alta resistencia con menos espesor que los tradicionalmente utilizados, debido a esto surge la necesidad de implementar aceros avanzados de alta resistencia [7,11].

La necesidad de reducir el peso total de los vehículos con el fin de disminuir el impacto ambiental, sin disminuir la seguridad de los mismos, ha llevado al desarrollo e implementación de los aceros avanzados de alta resistencia, los cuales han sido definidos como materiales ligeros indispensables para satisfacer las metas futuras del sector automotriz debido a sus elevadas propiedades mecánicas y su potencial de aligeramiento [6, 13, 14, 18].

Es vital conocer las propiedades mecánicas de los materiales que se van a implementar, por este motivo se realizó la caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia

mediante ensayos de tensión, los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y en las tres direcciones respecto a su laminación (0°, 45° y 90°) a distintas velocidades de deformación. Sala evaluó las propiedades mecánicas de los aceros DP800 y TRIP800 mediante ensayos de tensión bajo la norma EN 10002-1. Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación a una velocidad de deformación de 2.5mm/min, concluyendo que el acero TRIP800 presenta mas elevada la resistencia mecánica (σ_{max}) así como el mayor porcentaje de elongación (%El). Haduch realizó un estudio donde fueron fabricados aceros doble fase mediante un control de régimen de temperaturas de austenización y las velocidades de enfriamiento. Se realizó experimentación del temple de acero 1018 a diferentes temperaturas, 760° y 850°, las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante ensayos de tensión, pruebas de impacto y pruebas de dureza, se llegó a la conclusión que la fabricación de aceros doble fase es relativamente fácil y económica sin embargo estos aceros ofrecen propiedades superiores a los aceros convencionales [5,6].

Es necesario considerar el grado de conformabilidad del material debido a que estos serán sometidos a distintos procesos y deben de resistir el trabajo mecánico, por ello es indispensable determinar los diagramas límite de formado, estos muestran la deformación máxima a la fractura para diferentes relaciones de deformación bajo un esfuerzo biaxial, lo que nos permite conocer el límite de la deformación para los diferentes procesos de conformado. La sustitución de aceros convencionales por otros de mayor resistencia plantea como principal problema la disminución de las propiedades de conformabilidad, esenciales para la fabricación de piezas con geometrías complejas. Otro desafío es el procesamiento de estos aceros ya que sus propiedades finales tienen una gran dependencia de su microestructura final y exigen, por lo tanto, un control minucioso de su procesamiento. Debido a esto y a que los aceros avanzados de alta resistencia se consideran materiales relativamente nuevos con estructuras complejas presentan un gran reto para la investigación [5,7].

El método del elemento finito es una herramienta más que se utilizó dentro de las investigaciones realizadas a los aceros avanzados de alta resistencia, sus aplicaciones son muy amplias, ya que por medio de este se determinó el esfuerzo de Von Misses en piezas sometidas a compresión, la conformabilidad de los materiales mediante la obtención de los diagramas de límite de formado y la disminución del espesor al remplazar un acero convencional por uno de alta resistencia. Hongtu determinó la disminución del espesor al remplazar un acero convencional por uno de alta resistencia. Pastre estudió la variación en el espesor de la sección transversal que se puede conseguir al implementar los AHSS. La simulación por el método de elemento finito es necesaria debido a que es indispensable predecir como actuará el material según las condiciones a las que será sometido y consecuentemente serán los que determinen las posibilidades y los límites de cada uno de los aceros. [15, 16, 17, 19, 20, 21].

Las innumerables propiedades de los aceros avanzados de alta resistencia los vuelven ideales para aplicaciones automotrices ya que permiten fabricar piezas más delgadas manteniendo el desempeño y la seguridad de los pasajeros. Al implementar los aceros avanzados de alta resistencia en la industria automotriz se obtienen diferentes resultados de reducción de peso, dependiendo del tipo de acero utilizado y del diseño de la pieza a reemplazar. Shaw obtuvo reducciones de 20 a 25% del peso del chasis de un automóvil mediante el uso de AHSS. Hongtu consiguió una reducción del espesor en partes automotrices de 2mm a 1.6mm para las piezas que fueron reemplazadas con aceros avanzados de alta resistencia. Coleman consiguió reducciones de peso de 25% empleando AHSS. Krupitzer consiguió reducciones de peso de hasta 25% en partes estratégicas de la estructura de un automóvil sin mencionar que partes fueron reemplazadas por AHSS. Además Pastre elaboró un estudio sobre el diseño de un semirremolque para tráiler ultraligero para el transporte de productos y se obtuvo una reducción de peso de 20%, es decir 2.5 toneladas, lo que ha permitido incrementar la capacidad de carga útil, y esto a su vez que se

reduzca el número de viajes de transporte de mercancías en las carreteras. Mediante la aplicación de espesores más delgados se presentan ahorros del 20 al 25 % en términos de masa en la estructura de un vehículo, así como mejoras en el desempeño de absorción de energía durante las pruebas de impacto, aunado a la alta resistencia que caracteriza este tipo de aceros [15, 16, 17, 19, 20, 21].

Debido a las altas propiedades mecánicas y su potencial de aligeramiento estos aceros se usan en piezas donde se requiere mayor seguridad y alto grado de responsabilidad estructural como el montante A, armazón de los asientos, refuerzos del pilar central, cimbras de techo y además su alta resistencia a la deformación es indicada en la fabricación de piezas destinadas a evitar la penetración de objetos en la zona de pasajeros como por ejemplo el montante B. Además poseen un alto grado de endurecimiento por deformación lo cual es vital en caso de choque, lo que los hace aptos para aplicaciones automotrices [12, 14, 18].

Se han realizado estudios del impacto ambiental al utilizar los aceros avanzados de alta resistencia, obteniendo que si todo el vehículo es fabricado con estos aceros el ahorro anual en emisiones de CO₂ sería aproximadamente 156 millones de toneladas [11, 19].

No cabe duda, que el uso de los aceros avanzados de alta resistencia proporciona beneficios potenciales para aquellas aplicaciones donde se debe optimizar la relación resistencia-peso; se han constatado las mejoras alcanzadas en reducción de peso del vehículo, y seguridad en la industria automotriz.

Por último un aspecto determinante para la industria automotriz en la implementación de los aceros avanzados de alta resistencia son los costos, ya que estos son los que determinan si estos aceros pueden competir en el mercado. Se considera a los aceros avanzados de alta resistencia competitivos en términos de capacidad de formado, esfuerzos, absorción de

energía, además la ventaja adicional que presentan es la reducción de costos debido a que presentan altos esfuerzos. En el 2002, Shaw realizó un análisis de costos para el chasis de un automóvil de acero avanzado de alta resistencia obteniendo un costo total de ciclo de vida muy competitivo con respecto al que se emplea en un chasis de un automóvil de acero al carbono [11, 13, 16, 20].

Por lo que se puede concluir que la excelente combinación de propiedades mecánicas y costos hace a estos aceros muy competitivos en el mercado, es por ello que la industria automotriz espera que para el año 2015 la aplicación de los aceros AHSS se incremente hasta un 50%.

CAPÍTULO 3

ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La principal diferencia entre los aceros convencionales (HSS) y los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) se debe a su ruta de producción y control microestructural.

Los HSS son aceros que cuentan con una única fase, la ferrita. En cambio, los AHSS son aceros que tienen una estructura formada de diferentes fases, son aceros multifásicos, según el tipo de AHSS del que se trate. Pueden contener ferrita, martensita, bainita y austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas únicas. Estos aceros se caracterizan por presentar esfuerzo de cedencia mayor a 550MPa y 700 MPa en esfuerzo de ruptura o esfuerzo último. Algunos tipos de AHSS tienen una alta capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica del acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, lo que resulta en un balance resistencia-ductilidad superior a los aceros convencionales. Otros tipos tienen ultra alto esfuerzo de cedencia y resistencia a la tensión, y presentan un comportamiento de endurecimiento en caliente.

La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los aceros AHSS se consigue gracias a la combinación controlada de fases estables y

meta estables en una microestructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado.

Estos materiales son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez que han sido deformados. Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS AHSS

La forma más común de clasificar a los aceros AHSS es por su microestructura:

- Doble Fase (DP)
- Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP)
- Martensíticos (MART)
- Fase Compleja (CP)
- Ferríticos-Bainíticos (FB)
- Plasticidad Inducida por Maclaje (TWIN)

En los aceros doble fase (DP), el término dual proviene de la coexistencia de islas de martensita o bainita embebidas en una matriz de ferrita. Los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP) se caracterizan por presentar como mecanismo de endurecimiento por deformación la transformación de austenita a martensita inducida por el campo de tensiones generado a altos niveles de deformación. Su microestructura consiste en una matriz ferrítica que contiene una dispersión de martensita y bainita, junto con una fracción de austenita retenida, entre el 5% y el 20%. Los aceros de fase compleja (CP) presentan una microestructura muy fina de ferrita con una elevada fracción volumétrica de

fases duras que se endurece aun por precipitación de finos intermetálicos. Para fabricar los aceros martensíticos (M) la austenita presente durante la laminación en caliente, se transforma totalmente a martensita durante el enfriamiento. Son los aceros de mayor resistencia para conformado en frío, llegando hasta 1400 Mpa de carga de rotura.

Mas allá de estos niveles se sitúan los aceros de conformado en caliente, donde la austenita se transforma totalmente a martensita por el temple que sigue a la operación de conformado a alta temperatura (800-900°C). Entre los aceros de conformado en caliente destacan los aceros al Boro, con una resistencia del orden de 1500 Mpa.

Los AHSS se suelen denominar por sus siglas seguidas de su valor de resistencia a rotura (DP600, TRIP800, CP800, etc.).

En la figura 3.2 se clasifican estos aceros de alta resistencia en función de su conformabilidad en términos de alargamiento a rotura, de resistencia mecánica, y de resistencia a rotura.

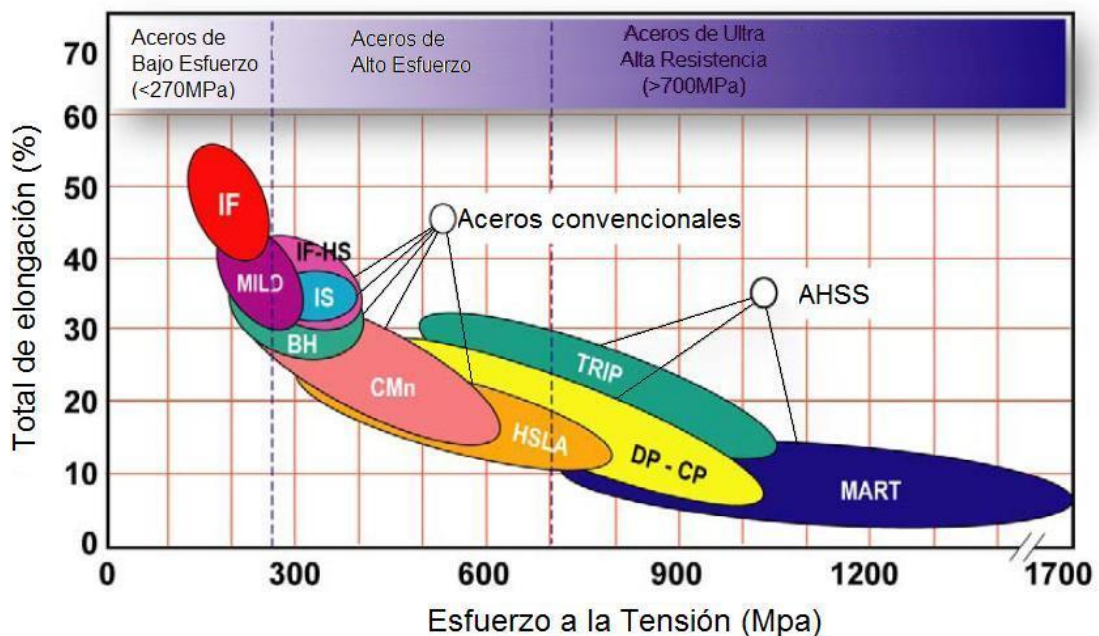


Figura 3.1 Clasificación de aceros AHSS en función de su conformabilidad [10].

Los métodos utilizados para su identificación varían de forma considerable en todo el mundo, por esto la industria siderurgia de forma global recomendó un sistema de clasificación que define cada grado por su tipo metalúrgico, esfuerzo de cedencia, y resistencia a la tensión. Bajo esta nomenclatura, los aceros son identificados como

“XX/ aaa/ bb”

Donde:

XX = Tipo de acero

aaa = Límite elástico en MPa

bbb = Límite de rotura en Mpa

Por ejemplo, DP 600/800 se refiere a un acero doble fase con un límite elástico de 600MPa de esfuerzo de cedencia y 800MPa de esfuerzo de tensión. En algunas ocasiones se puede encontrar con una versión abreviada de este sistema, en la que solo se indica el límite elástico, en este caso DP600. Esta clasificación fue utilizada en el programa ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicule Concepts).

Grado de Acero	Esfuerzo Cedencia (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Total de Elongación (%)
HSLA 350/450	350	450	23-27
DP 300/500	300	500	30-34
DP 350/600	350	600	24-30
TRIP 450/800	450	800	26-32
DP 500/800	500	800	14-20
CP 700/800	700	800	10-15
DP 700/1000	700	1000	12-17
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6

Tabla 3.1 Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC. YS y UTS son valores mínimos. Tot. EL (elongación total) es un valor típico para un gran rango de espesores y longitudes calibradas [10].

3.3 ACEROS DOBLE FASE (DP)

3.3.1 OBTENCIÓN DE LOS ACEROS DP

Los aceros de doble fase consisten en una matriz de ferrita con una segunda fase de martensita dura en forma de islas, al aumentar el volumen de la fracción de la segunda fase dura, generalmente incrementa la resistencia del material.

Los aceros doble fase (ferrita + martensita) son producidos mediante enfriamientos controlados desde la fase austenítica (en productos rolados en caliente) o desde una fase de austenita mas ferrita (para recocido continuo, rolado en frío y productos recubiertos en caliente por inmersión) para transformar parte de la austenita en ferrita, luego se realiza un enfriamiento rápido para transformar la austenita restante a martensita. Dependiendo de la composición y del proceso de obtención, los aceros laminados en caliente requieren tener la capacidad de resistir un estirado en los bordes, entonces puede que la microestructura contenga cantidades significantes de bainita. En la figura 3.3 se observa el esquema de la obtención de aceros DP por enfriamiento controlado.

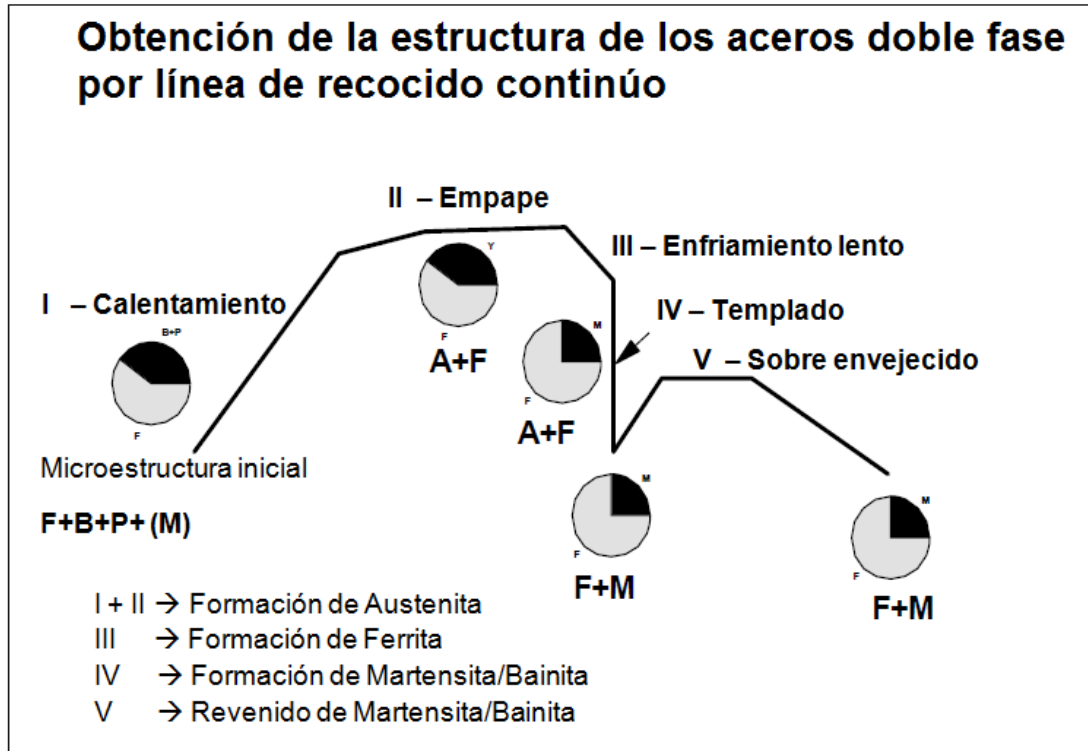


Figura 3.2 Esquema de obtención de aceros DP por enfriamiento controlado [22].

Los aceros DP también pueden ser fabricados mediante un procesamiento termo mecánico que consiste en austenitizar completamente el acero y laminarlo en caliente en la región austenítica, seguido de enfriamiento al aire en la región bifásica ($\alpha+\delta$), para finalmente templear en agua.

La temperatura de temple seleccionada influye en el nivel de resistencia alcanzado por el producto final. A temperaturas más elevadas, mayor la cantidad de austenita que durante el temple transforma en martensita. Se añaden al acero Mn, Cr y Mo para incrementar la templabilidad del material. Así el proceso de enfriamiento y la templabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.

3.3.2 MICROESTRUCTURA DE ACEROS DP

La microestructura de los aceros de doble fase consiste esencialmente en una matriz ferrítica con cantidades variables de martensita, de acuerdo al grado. Estos aceros son producidos de manera general a partir de aceros hipoeutectoides (según el diagrama de fases hierro-carbono tienen un contenido de carbono inferior al correspondiente a la composición eutectoide 0.77%, están formados por una mezcla de ferrita y perlita), mediante un tratamiento térmico que consiste en un recocido o austenitización parcial a temperaturas ubicadas en la región intercrítica (entre A_3 y A_1) del diagrama de fases Fe-Fe₃C, que descompone la estructura ferrítico-perlítica inicial en una microestructura ferrítico(α)-austenítica(γ), al transformar la perlita(ferrita+Fe₃C) en austenita, y seguido por un temple promueve la transformación de austenita a martensita, generando un material de estructura bifásica con contenidos variables de ferrita y martensita. Ver figura 3.5 y 3.6.

La figura 3.4 muestra un esquema de la microestructura de los aceros de doble fase, la cual contiene ferrita más islas de martensita. Donde la fase suave de ferrita es una fase continua, da a estos aceros excelente ductilidad. Cuando estos aceros se deforman, el esfuerzo se concentra en la baja resistencia de la ferrita alrededor de las islas de martensita, creando un único endurecimiento por deformación, al igual que otros tipos de aceros avanzados de alta resistencia, los aceros doble fase también pueden sufrir endurecimiento por calentamiento.

En los aceros de doble fase, el carbono permite la formación de martensita en rangos de enfriamiento que incrementan la dureza del acero. El manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel adheridos individualmente o en combinación, dan una mayor resistencia y soldabilidad.

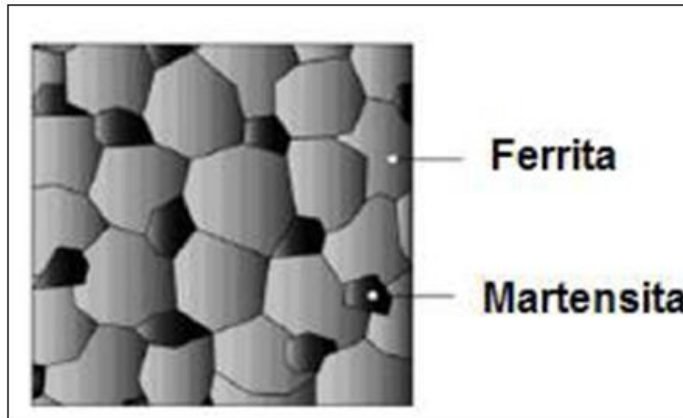


Figura 3.3 Esquema de la microestructura de los aceros DP [10].

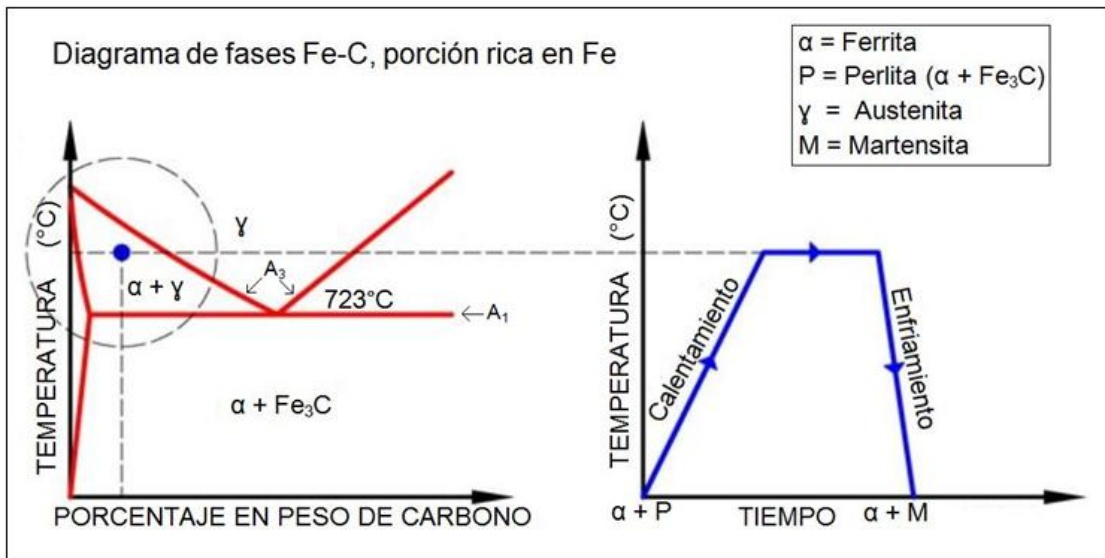


Figura 3.4 Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero DP [23].

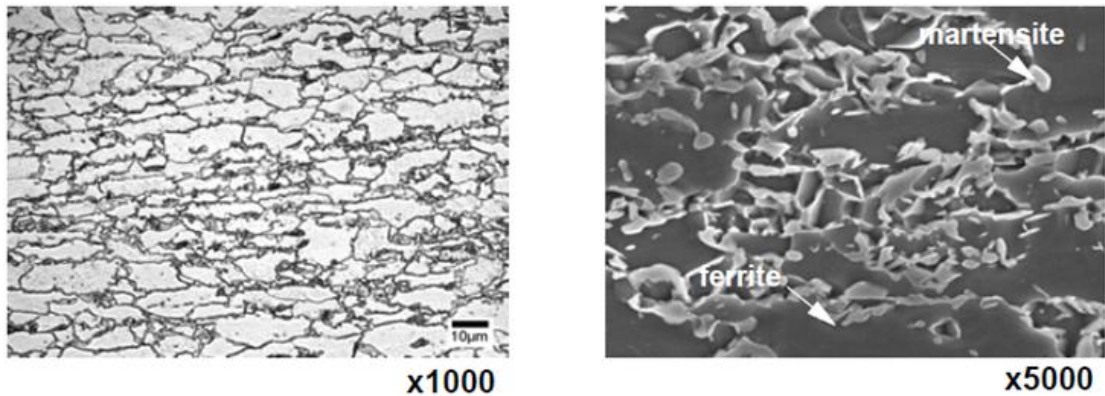


Figura 3.5 Metalografía de un acero DP, mostrando una microestructura consistente de ferrita y martensita [22].

3.3.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACEROS DOBLE FASE 600 Y PROPIEDADES MECÁNICAS

La composición química nominal de los aceros doble fase 600 se muestra en la tabla 3.2, esta puede tener variaciones de acuerdo al tipo de proceso mediante el cual se obtuvieron las fases, como se mencionó anteriormente Mn, Cr, Mo, V y Ni se añaden al acero para incrementar la templabilidad del material. Así, el proceso de enfriamiento y la templabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.

El carbono consolida la martensita como soluto endurecedor en la ferrita, al igual que el silicio y el fósforo, pero manteniendo también la buena resistencia y su capacidad de conformado.

	C	Mn	Si	P	S	N	Al	Ti	Nb	V	B	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn
%	.115	1.55	.186	.026	.005	.0032	.035	.002	.003	.002	.0003	.012	.347	.026	.110	.003

Tabla 3.2 Composición química de aceros doble fase 600 [26].

La resistencia de los aceros depende principalmente de la cantidad y dureza de la martensita en la estructura, la cual puede variar de 10 a 40% en peso, dentro de la matriz de ferrita. La dureza de la martensita está

directamente relacionada con su contenido de carbono, la dureza de la martensita aumenta a medida que el contenido de carbono aumenta.

Otra característica relevante del comportamiento mecánico de los aceros DP es que no exhiben el fenómeno de punto de cedencia o cedencia discontinua que causa la aparición de bandas de Lüders, lo que evita problemas de apariencia superficial.

Las altas tasas de endurecimiento en el trabajo, además de una excelente elongación, dan a los aceros doble fase fuerzas máximas de tensión más altas que las de los aceros convencionales con fuerzas de rendimiento parecidas. Al ser comparadas con aceros de alta resistencia con aleaciones menores y con una fuerza de rendimiento similar, los aceros doble fase muestran tasas iniciales mas altas de endurecimiento en el trabajo, fuerza máxima de tensión y una menor tasa de fuerza de rendimiento a la fuerza máxima a la tensión. Ver figura 3.7 y 3.8.

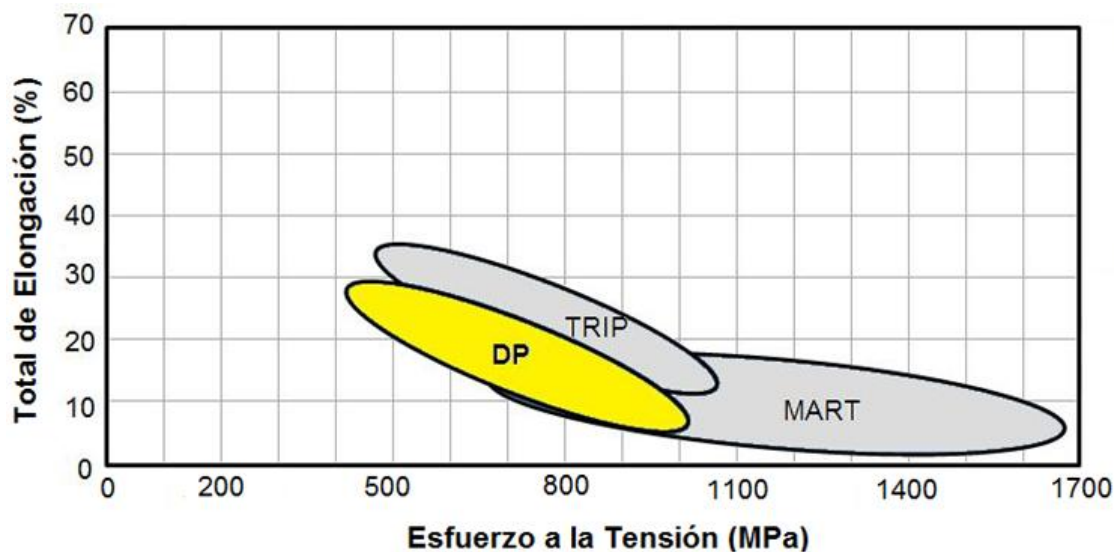


Figura 3.6 El esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros doble fase y su porcentaje de elongación [2].

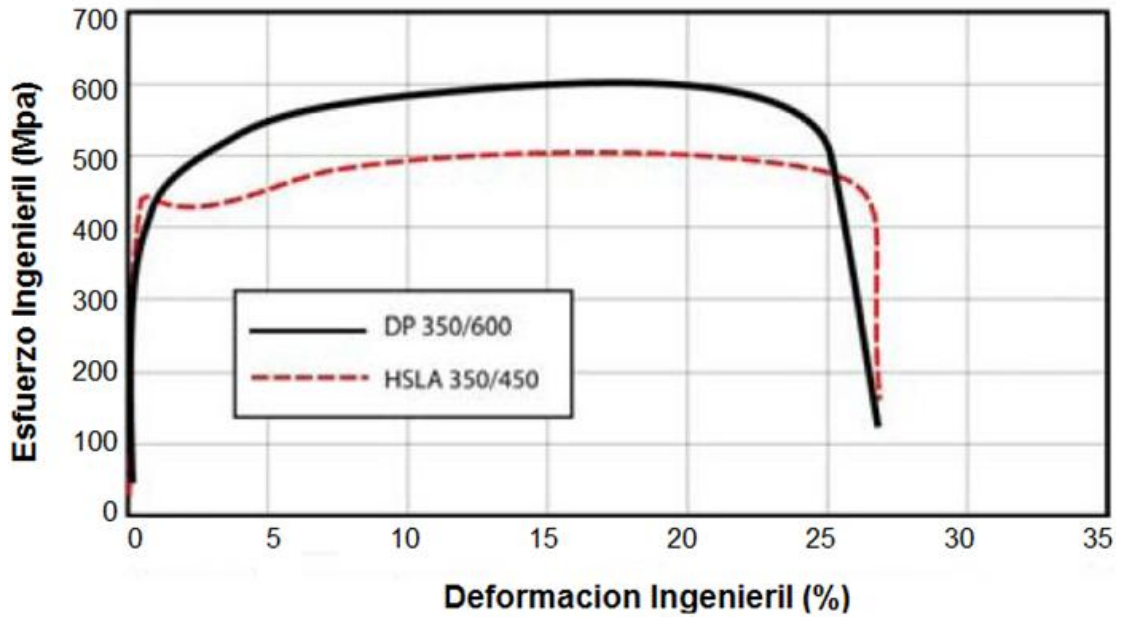


Figura 3.7 Comparación de la curva σ - ϵ de un DP con un HSLA con el límite elástico similar (350Mpa). El acero DP presenta un trabajo de endurecimiento inicial más elevado, una tensión máxima más elevada y un radio YS/TS más pequeño que el HSLA [10].

3.4 ACEROS DE PLASTICIDAD INDUCIDA POR TRANSFORMACIÓN (TRIP)

3.4.1 OBTENCIÓN DE LOS ACEROS TRIP

El ciclo térmico aplicado para fabricarlos es similar al del usado en los aceros DP. La lámina es calentada rápidamente en la región intercrítica para formar una mezcla de austenita y ferrita. La mayor diferencia es la introducción de un mantenimiento isotérmico en la región bainítica, (o un enfriamiento lento) para generar bainita y retener austenita en la estructura final. Esto se logra al deprimir la temperatura M_s abajo del cero al enriquecer en carbono la austenita no transformada. El enriquecimiento en carbono mediante solamente la formación de ferrita es insuficiente. Por lo tanto, un mayor enriquecimiento en carbono se alcanza mediante la formación de bainita. Si y Al se añaden no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la formación de bainita. De esta manera el carbono rechazado desde

la ferrita enriquece la austenita, la cual queda retenida en la microestructura final. Ver figura 3.9.

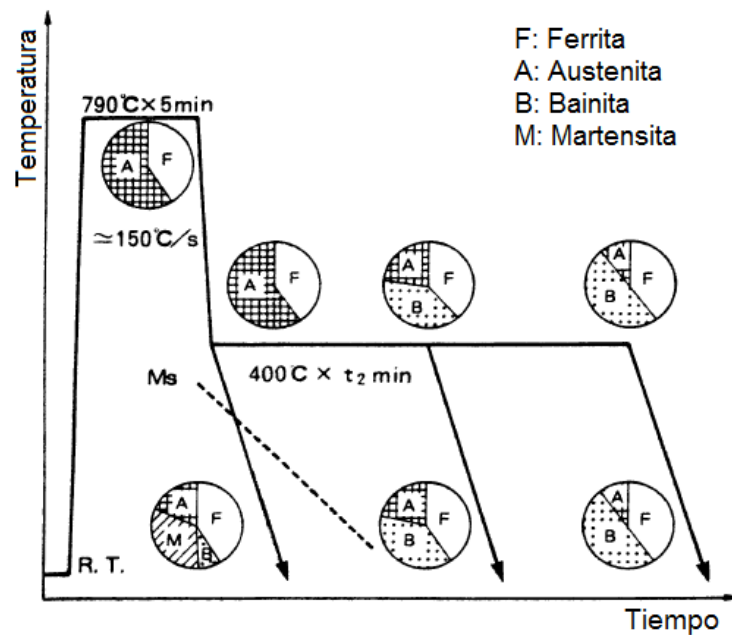


Figura 3.8 Esquema que muestra la obtención de los aceros TRIP [22].

3.4.2 MICROESTRUCTURA DE ACEROS TRIP

Su microestructura consiste principalmente de tres fases: ferrita, bainita y austenita retenida, aunque también es común la presencia de martensita. Cuando la energía de activación necesaria es inducida durante la deformación, la austenita retenida se transforma a martensita mejorando significativamente el endurecimiento por trabajado del material. Ver figura 3.10.

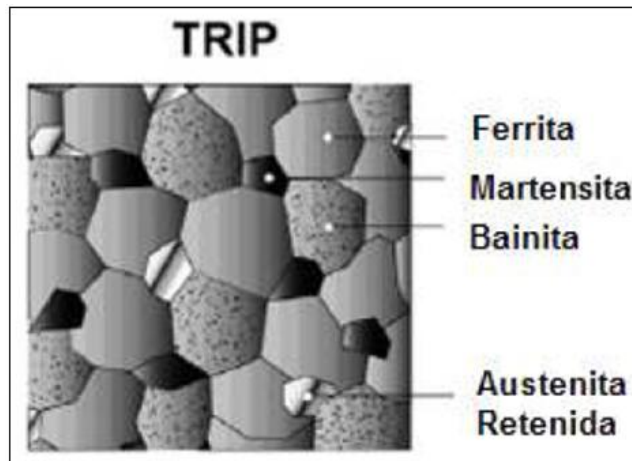


Figura 3.9 Microestructura típica de un acero TRIP [10].

3.4.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN ACERO TRIP Y PROPIEDADES MECÁNICAS

El silicio se usa como elemento desoxidante junto con el manganeso con el objetivo de evitar que aparezcan en el acero poros y defectos internos, mejora la resistencia a la oxidación, aumenta la templabilidad en los aceros y aumenta la resistencia de los aceros de baja aleación. Además eleva el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la fatiga de los aceros sin reducir su tenacidad.

El manganeso se añade para neutralizar la influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante el proceso de fabricación. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, en parte que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a la formación de porosidades perjudiciales en el material. Aumenta la templabilidad del acero siendo su empleo muy económico.

El aluminio es un elemento desoxidante. Es el elemento más eficaz para controlar el crecimiento de grano antes del enfriamiento. El titanio, circonio y el vanadio son también efectivos inhibidores del crecimiento de

grano sin embargo para grados estructurales que son tratados térmicamente (enfriamiento y templado) estos elementos pueden tener efectos adversos en la dureza porque sus carburos son muy estables y difíciles de disolver en la austenita antes del enfriamiento.

La composición química nominal de un acero TRIP800 se muestra en la tabla 3.3. Los aceros TRIP usualmente contienen mayor cantidad de carbono que los DP, con el fin de tener suficiente contenido de carbono para estabilizar la austenita retenida a temperatura ambiente. Los elevados contenidos de silicio y/o aluminio, sirven para acelerar la formación de ferrita/bainita. Estos elementos ayudan en el mantenimiento del carbono suficiente para mantener la austenita retenida, a fin de promover su microestructura multifase. Como se menciona anteriormente el Si y Al se añaden no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la formación bainítica.

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr.	Mo	V	Ti	Sn	Al	Cu	B
%	0.232	1.653	1.55	0.004	0.010	0.036	0.033	0.018	0.006	0.004	0.006	0.041	0.033	0.002

Tabla 3.3 Composición química de aceros TRIP 800 [26].

Mediante el ajuste de contenido en carbono se consigue el nivel de deformación a partir del cual la austenita retenida empieza a transformar en martensita. A bajos contenidos en carbono, la austenita retenida comienza la transformación casi cuando empieza la deformación del material, incrementando el endurecimiento y la formabilidad durante el proceso de estampación.

A elevados contenidos de carbono, la austenita retenida es más estable y transforma a niveles de deformación más allá de los producidos durante el conformado. A estos niveles la austenita retenida persiste en la parte final, transformando a martensita durante un proceso posterior, como podría ser una rotura.

Se ha demostrado que los aceros TRIP ofrecen una ductilidad superior y un mayor grado de endurecimiento por trabajado que los grados de acero DP con el mismo nivel de resistencia mecánica. Ver figura 3.11.

Sin embargo, la producción de aceros TRIP conlleva un costo adicional debido a que el procesamiento es más complicado y por la adición de aleantes al comparárseles con los aceros DP.

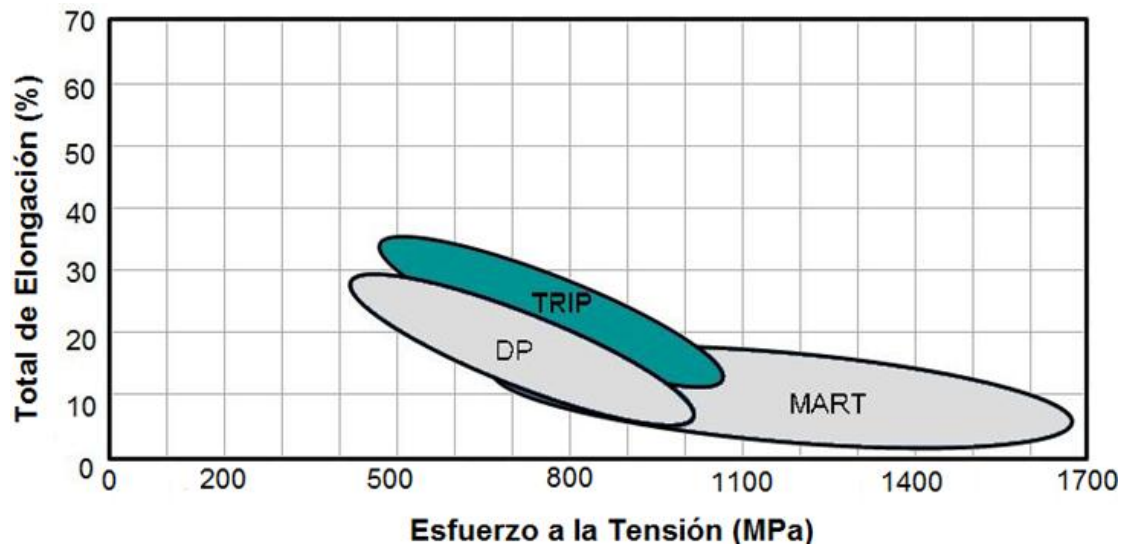


Figura 3.10 Esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros TRIP y su porcentaje de elongación [2].

En la figura 3.12 se observa el comportamiento σ - ϵ de HSLA, DP y TRIP de un límite elástico similar. El TRIP tiene un comportamiento de endurecimiento inicial menor que el DP, pero el endurecimiento perdura a altos niveles de deformación cuando ya decrece en el DP.

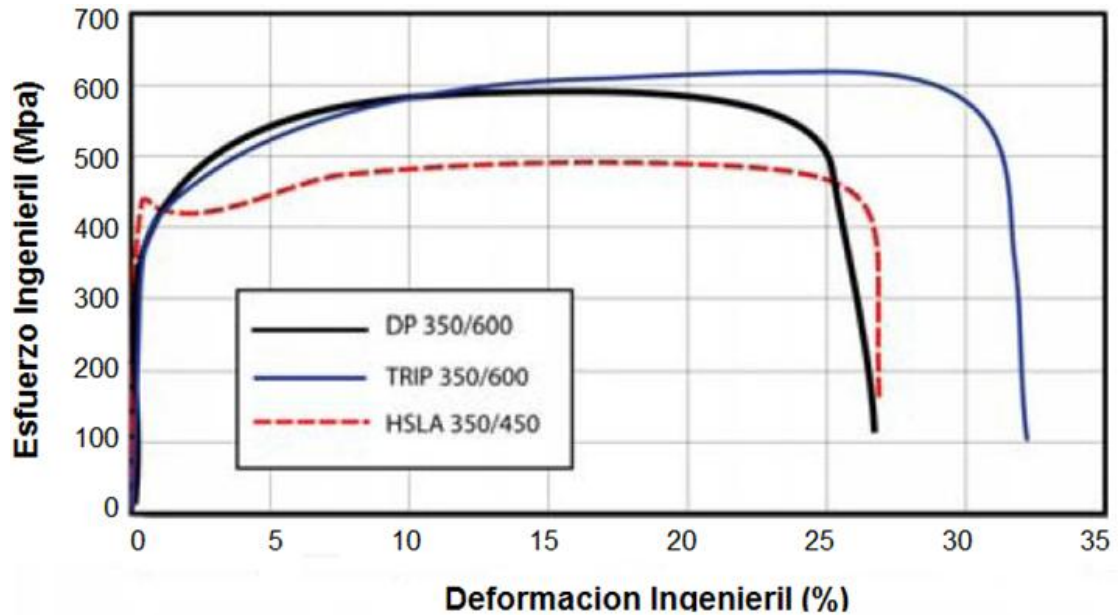


Figura 3.11 Comparación de TRIP, DP y HSLA mediante curva σ - ϵ ingenieril [10].

Las tasas de endurecimiento en el trabajo de los aceros TRIP son sustancialmente superiores a las de los aceros de alta resistencia convencionales, lo cual brinda ventajas únicas en el formado por estiramiento y en el estampado por embutido. Los niveles más altos de esfuerzo en los aceros TRIP, proporcionan una ligera ventaja sobre los aceros doble fase en aquellas aplicaciones más severas de formado por estiramiento.

Los aceros TRIP pueden ser usados para proporcionar excelentes propiedades de conformado y resistencia a piezas, así como para brindar excelentes propiedades de resistencia a la rotura y de absorción de impacto.

3.5 ACEROS MARTENSÍTICOS (M)

3.5.1 OBTENCIÓN DE LOS ACEROS MARTENSÍTICOS

Para producir los aceros martensíticos, la austenita que existe durante el laminado en caliente o recocido es transformada casi totalmente a martensita durante el temple (enfriado rápidamente) desde una temperatura en fase austenítica hasta temperatura ambiente, la transformación provoca una estructura martensítica dura en la cual el carbono, originalmente en solución en austenita, se encuentra en forma de solución sólida.

La transformación martensítica es una transformación independiente del tiempo y solo dependiente del valor absoluto de las temperaturas, lo que se define como transformación atérmica. La formación de martensita en la mayoría de los aceros va desde 300°C hasta la temperatura ambiente. Inicia a una temperatura de formación de martensita o temperatura Ms (Martensite start) y termina a una temperatura final de la formación de martensita o temperatura Mf (Martensite finish), ocurre en forma gradual con el enfriamiento. El contenido de carbono en la martensita es dependiente de la temperatura de enfriamiento. A medida que aumenta la temperatura final de enfriamiento, el contenido de carbono en la martensita disminuye. La austenita no transformada después de la temperatura Mf se le conoce como austenita retenida o residual. Dados los deslizamientos que realiza la red durante la transformación se produce una alta densidad de dislocaciones y en ocasiones microfisuras.

3.5.2 MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS MARTENSÍTICOS

Los aceros martensíticos son caracterizados por una matriz martensítica con pequeñas cantidades de ferrita o bainita. La martensita corresponde a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. La transformación martensítica ocurre, a diferencia de la transformación perlítica, en forma adifusional, en un proceso de deslizamiento de carácter altamente cristalográfico, que lleva a una microestructura lenticular o en listones. Ver figura 3.13.

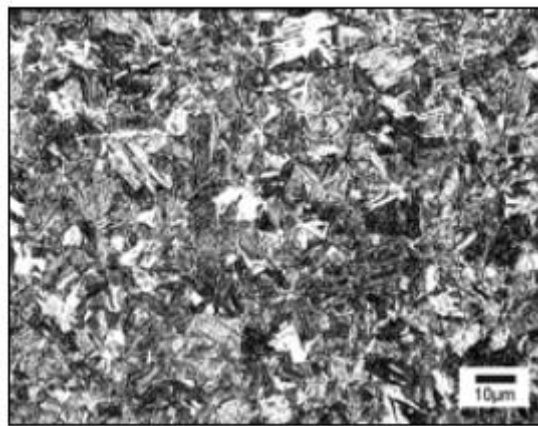


Figura 3.12 Esquema de la microestructura de los aceros martensíticos [22].

3.5.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE UN ACERO MARTENSÍTICO Y PROPIEDADES MECÁNICAS

La composición química de los aceros martensíticos 700/900 se muestra en la tabla 3.4. Dentro del grupo de los aceros multifase, los aceros martensíticos muestran niveles de alto esfuerzo a la tensión, arriba de 1700MPa como esfuerzo último. Estos aceros son tratados térmicamente por relevado de esfuerzos para proveer ductilidad y adecuada formabilidad con alta resistencia. Ver figura 3.14.

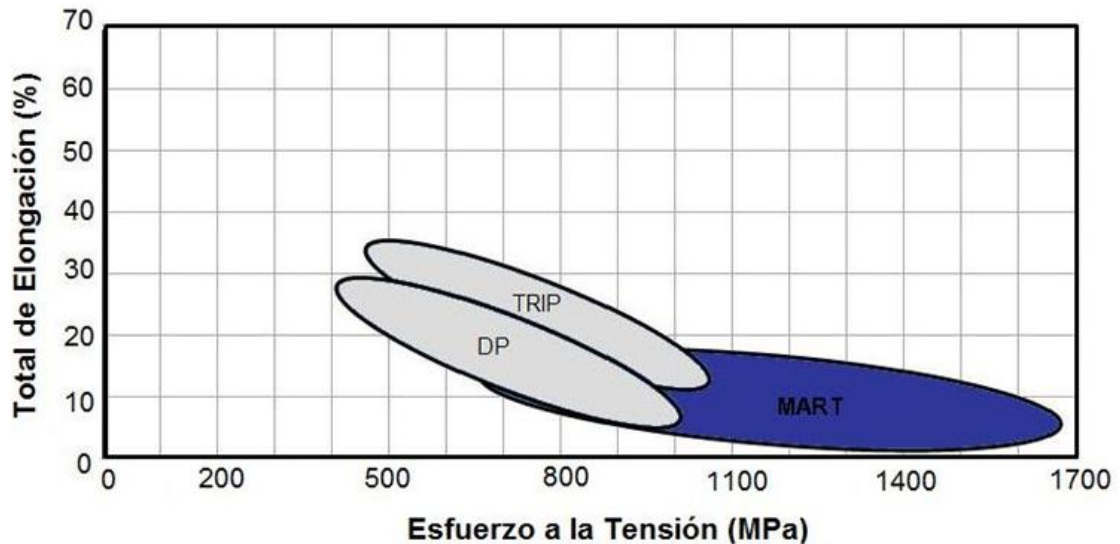


Figura 3.13 Esquema que muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros martensíticos y su porcentaje de elongación [2].

El carbono es agregado a los aceros martensíticos para incrementar templabilidad y fortalecer la martensita; manganeso, silicio, cromo, molibdeno, boro, vanadio y níquel son también usados en varias combinaciones para incrementar la dureza.

	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
%	0.19	0.004	0.49	.0004	0.24	0.03	.018	0.04	0.019	0.004	0.002	0.046	0.002

Tabla 3.4 Composición química de aceros martensíticos 700/900 [26].

3.6 ACERO DE FASE COMPLEJA (CP)

La microestructura de los aceros fase compleja (CP) está compuesta de pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita contenida en una matriz de ferrita/bainita.

Se crea un refinamiento de grano muy fino para retardar la recrystalización o precipitación de elementos microaleantes como Ti o Cb. Estos aceros tienen un tamaño de grano ASTM de alrededor de 14. En comparación con los aceros DP, estos aceros muestran significativamente

alto esfuerzo de cedencia y esfuerzos a la tensión de 800 MPa o más. Están caracterizados por alta energía de absorción y alta capacidad de deformación. Ver figura 3.15.

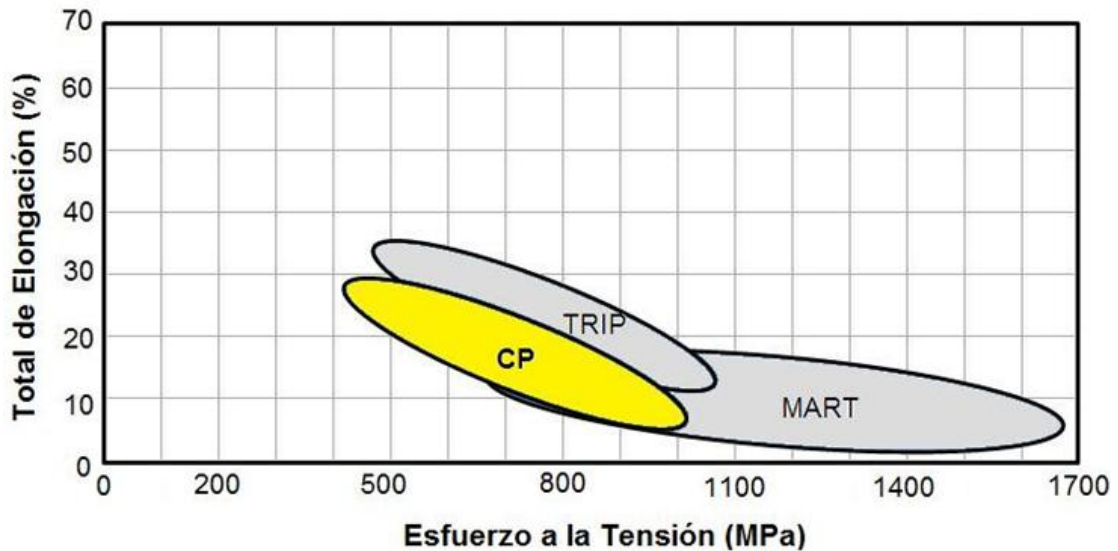


Figura 3.14 Rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros de fase compleja y su porcentaje de elongación [2].

3.7 ACEROS FERRÍTICOS-BAINÍTICOS (FB)

Estos aceros contienen una estructura de ferrita fina y bainita. El esfuerzo se obtiene por refinamiento de grano y por la bainita presente, este tipo de acero está disponible como producto laminado en caliente; tienen buena soldabilidad, buen rendimiento al impacto y resistencia a la fatiga. Ver figura 3.16.

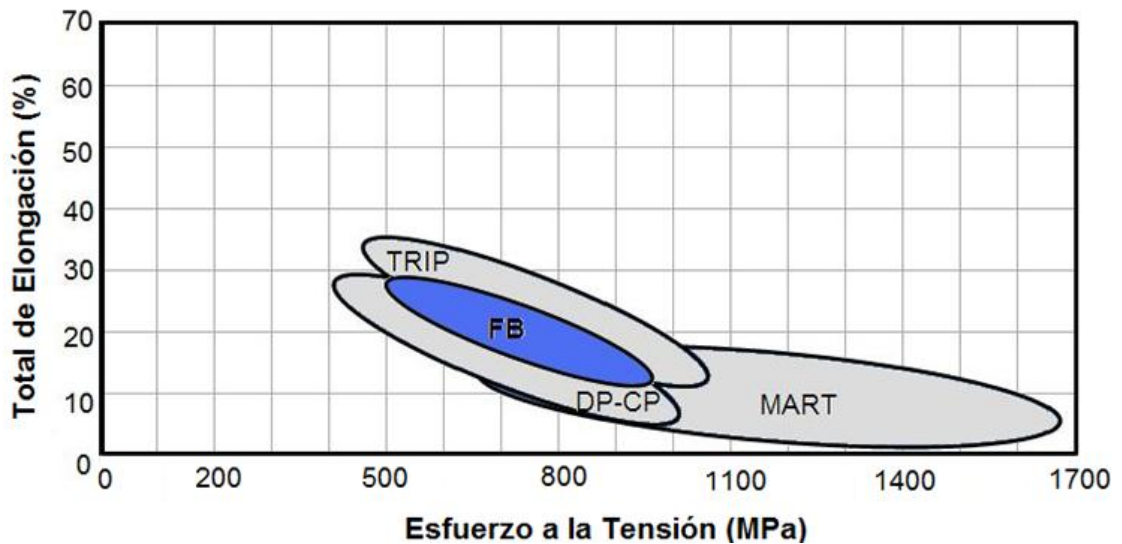


Figura 3.15 Rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros de FB [2].

3.8 ACEROS PLASTICIDAD INDUCIDA POR MACLAJE (TWIN)

Estos aceros tienen altos porcentajes de manganeso (17-24%) lo cual causa que sean completamente austeníticos a temperatura ambiente. Esta característica es el principal modo de plasticidad inducida por maclaje, generadas durante la deformación. Las maclas causan un incremento instantáneo del rango de endurecimiento (valor n), así es como la microestructura llega a ser muy fina. El resultado del maclaje se manifiesta dándole resistencia al acero. Los aceros TWIP combinan una extrema resistencia con una alta formabilidad. El valor n incrementa a un valor de 0.4 a un esfuerzo ingenieril aproximado de 30% y entonces permanece constante hasta una elongación total alrededor del 50%. La resistencia a la tensión es más alta que 1000MPa. Ver figura 3.17.

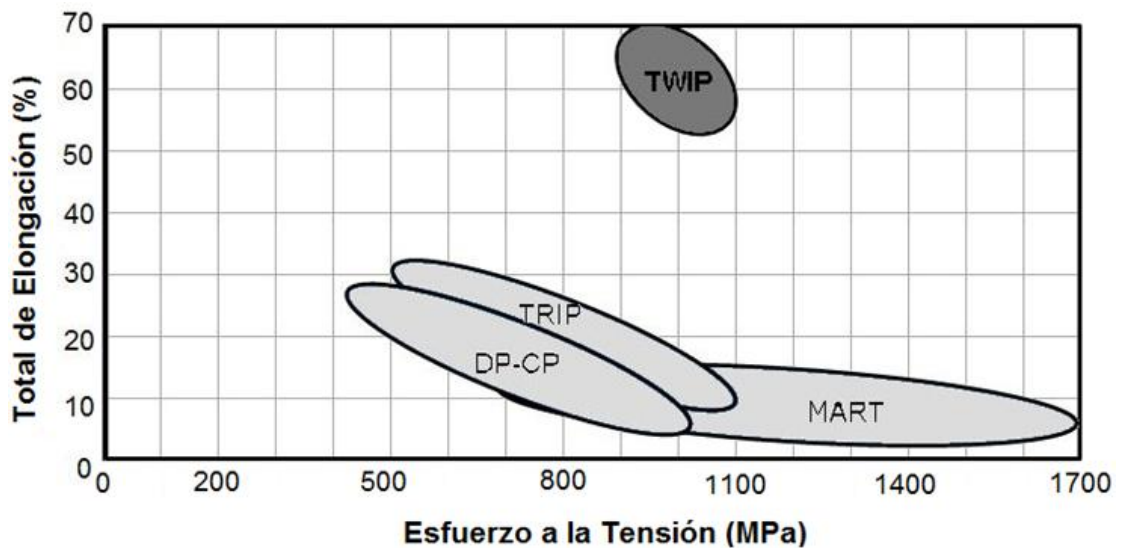


Figura 3.16 Esquema de los rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros TWIP [2].

3.9 CONFORMABILIDAD DE LOS ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA

El conformado de los AHSS es actualmente la mayor problemática que presentan estos aceros. Se ha constatado las mejoras alcanzadas desde los costos, ligereza y alta resistencia, de ahí que empresas de todo el mundo estén al tanto de los avances con respecto a la investigación de estos materiales.

Los nuevos AHSS poseen unas características mecánicas diferentes a las convencionales que se traducen en un desconocimiento por parte de algunos ingenieros a la hora de trabajar con ellos. Conocer el material con el que se va a trabajar es importante para saber diseñar el producto final, de la misma forma que hay que tener un amplio conocimiento de las herramientas con las que se producirán las piezas. Si no se realiza una importante investigación y puesta en marcha de estos aceros pueden tener distintos problemas de aplicación o mal conformado final del producto que se traducirá en pérdidas económicas.

La principal diferencia en cuanto a conformabilidad entre los AHSS, y los aceros de alta resistencia convencionales, como los aceros microaleados o HSLA, es que los primeros poseen una mayor capacidad de endurecimiento por deformación o trabajo en frío. Esta alta capacidad de endurecimiento por deformación permite aumentar la resistencia mecánica del acero sin reducir su conformabilidad, e incluso aumentarla, al resistir mejor la estricción localizada durante su conformado.

La buena combinación de resistencia y conformabilidad de los AHSS se consigue debido a la combinación controlada de fases estables y meta estables en una microestructura fina, la cual se ve significativamente modificada en el proceso de conformado.

Los aceros AHSS son relativamente blandos y aumentan su resistencia al ser deformados, siendo por lo tanto, fácilmente conformables y extremadamente resistentes una vez que han sido deformados (del orden de 4 a 5 veces más que un acero convencional). Además, gracias a su capacidad de ganar resistencia con la deformación, pueden ser embutidos con menor riesgo de rotura, pues las zonas más deformadas y con más tendencia a rasgarse, son las que más resistencia desarrollan.

Como contraste, y debido a su elevada resistencia mecánica, aparecen problemas en la implementación de estos aceros [14], como:

- La rotura de herramientas a causa de los elevados requerimientos de tonelaje necesarios para la formación de piezas, a partir de acero con resistencias del doble o triple de aquella de los aceros convencionales de alta resistencia.
- Desgaste de la herramienta: Los insertos endurecidos y los filos de las cuchillas de corte pueden desgastarse en el transcurso de una sola corrida de producción, a causa de la dureza de los AHSS, la cual casi es igual a aquella del material con el que está hecho el mismo troquel.

- Problemas de calidad en las dimensiones de las piezas que surgen a causa de la recuperación elástica (springback) asociado con la alta resistencia, y con el aumento de la sensibilidad en el proceso por la variabilidad en las propiedades del material a niveles superiores de resistencia.
- La ausencia de datos metalúrgicos detallados del acero para dar soporte en las simulaciones del proceso de formado, y así asegurar la continuidad en el uso del mismo material a través de todo el proceso de desarrollo y pruebas, lo que ayudaría a disminuir los errores al predecir el efecto de la recuperación elástica (springback).

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se presenta la experimentación llevada a cabo, los métodos utilizados para preparación de las muestras y la metodología que se siguió en este trabajo de investigación; así como también las técnicas utilizadas para la caracterización del material, la obtención de sus propiedades mecánicas, microscópicas, y de composición química.

4.1 MATERIALES BASE

Para la elaboración de esta tesis, han sido utilizados dos aceros avanzados de alta resistencia (AHSS): DP600 Y PM590, uno perteneciente al grupo de aceros doble fase (DP) y el otro es una modificación de un acero martensítico, identificado como acero parcial martensítico (PM), con la finalidad de poder determinar y comparar sus propiedades mecánicas. Para ello, se ha elegido una lámina de cada acero, en cada una de ellas se obtuvieron probetas a 0°, 45° y 90° respecto a su dirección de laminación. Para el acero DP corresponde un calibre de 2.48mm y 1.74mm para el acero PM. Ambos aceros cuentan con características lo más similares posibles, el mismo proceso de obtención de acero (laminado en caliente) y casi la misma resistencia máxima. Estos aceros se nombran en función del valor de su resistencia máxima según el sistema de clasificación de aceros usados por el programa ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts). El material fue proporcionado por la empresa METALSA S.A. de C.V.

4.1.1 ACERO DP600

Este tipo de acero ha sido descrito en el capítulo anterior en el apartado 3.4. En este apartado se procederá a exponer la composición nominal del tipo de acero a estudiar.

Tipo de	%C Max	%Si Max	%Mn Max	%P Max	%S Max	%Al Max	%Cr + %Mo Max	%Nb + %Ti Max	%V Max	%B Max
DP 600	0.17	0.80	2.20	0.08	0.02	2.00	1.00	0.15	0.20	0.005

Tabla 4.1 Composición química nominal de acero doble fase 600.

Acero de bajo contenido de Carbono y con los elementos de aleación; Mn, Si y Cr con la finalidad de obtener características específicas.

4.1.2 ACERO PM590

Este tipo de acero ha sido descrito en el capítulo anterior en el apartado 3.6. En este apartado se procederá a exponer la composición nominal del tipo de acero a estudiar.

Tipo de	%C Max	%Si Max	%Mn Max	%P Max	%S Max	%Cr + %Mo Max	%Nb + %Ti Max	%V Max
M	0.19	0.24	0.49	0.004	0.004	0.07	0.05	0.004

Tabla 4.2 Composición química nominal de acero martensítico.

Acero de bajo contenido de carbono, aleado con manganeso, con presencia de cromo, níquel y niobio. El niobio produce una refinación de la microestructura consistente en un tamaño de grano más fino y por consiguiente el acero incrementa su resistencia, es considerado como endurecedor del acero.

4.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para realizar los ensayos químicos, metalográficos y de dureza se cortaron muestras en pequeñas secciones de lámina de 1cm^2 . Posteriormente dependiendo del análisis se continúa con preparaciones específicas las cuales se describirán mas adelante.

Para los ensayos de tensión, se obtuvieron probetas de acuerdo a ASTM E8 a 0° , 45° y 90° con respecto a la dirección de laminación para cada uno de los aceros estudiados (figura 4.1), mediante una máquina de corte con agua y arena, la cual se muestra en la figura 4.2.

En la figura 4.3 se muestra la distribución de las probetas en las diferentes secciones de lámina para cada uno de los aceros, de la primera lámina se obtuvieron las probetas a 0° , de la segunda las probetas a 90° y de la tercera las probetas a 45° . Se cortaron 10 probetas por sección de lámina para cada uno de los aceros.

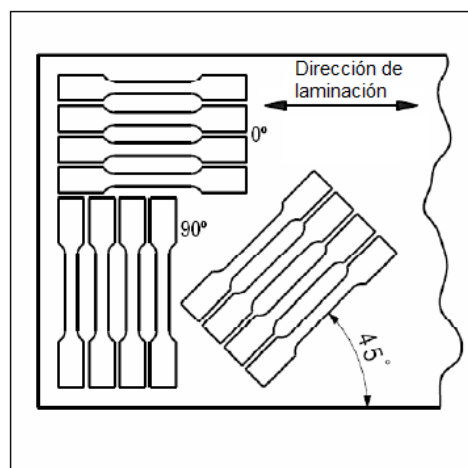


Figura 4.1 Posición en las que fueron cortadas las probetas para ensayos de tensión.



Figura 4.2 Máquina de corte con agua y arena.

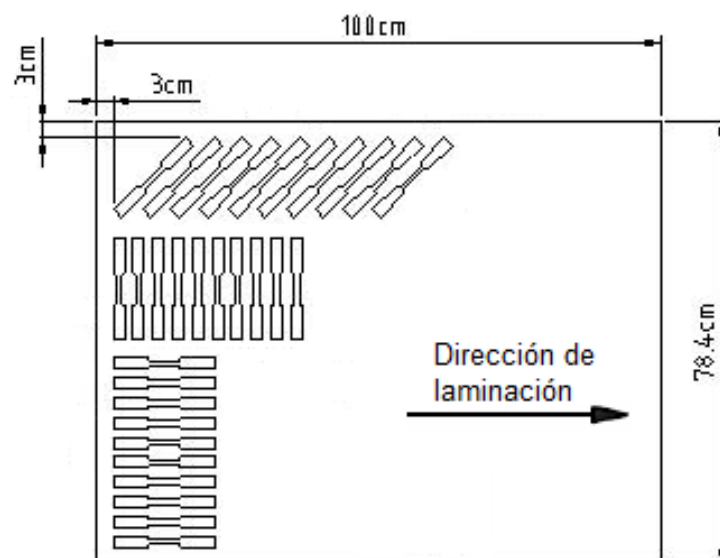


Figura 4.3 Distribución de las probetas en las diferentes secciones de lámina.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

4.3.1 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se realizó utilizando un espectrómetro de emisión de óptica, marca BELEC y modelo VarioLab, el cual se muestra en la figura 4.4. Este equipo hace pasar una corriente a través de la muestra (utilizada como electrodo) produciendo una chispa y emitiendo luz, de acuerdo al espectro de la luz emitida se calculan los elementos presentes.



Figura 4.4 Espectrómetro de emisión de óptica, marca BELEC y modelo VarioLab.

El principio de trabajo de este equipo es pasar una descarga eléctrica que excita a los átomos hasta hacerlos radiar. La radiación en forma de luz es dispersada en sus longitudes de onda, y se mide la intensidad de las líneas espectrales. Una descarga eléctrica es generada entre un electrodo y la muestra que se va a analizar (utilizando argón). El material de la superficie es vaporizado, el equipo colecta la luz del plasma a través de un cuarzo hacia la óptica en donde la energía que entra a través de los fotomultiplicadores

sale como corriente y es convertida en voltaje (intensidades de cada elemento analizado).

Este equipo compara el espectro de la muestra con una base de datos interna, el equipo debe ser calibrado para ser utilizado con ciertas aleaciones, en este caso el espectrómetro de emisión estaba calibrado y certificado para una gran variedad de aceros.

Las muestras se deben pasar por una operación de careado para garantizar que la superficie sea completamente plana y no existan discontinuidades en las chispas debido a algún relieve en la muestra.

4.3.2 ANÁLISIS METALGRÁFICO

Para la preparación metalográfica, la muestra se cortó como se describe en el apartado 4.2, se analizó la cara transversal de la muestra respecto a la dirección de laminación (ver figura 4.5), el corte se debe de hacer con el mayor cuidado posible, buscando no producir cambios en el material como transformaciones de fase, debido a esto se utilizó una máquina de corte por agua.

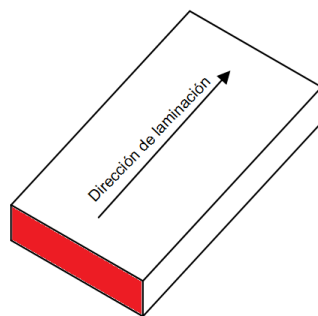


Figura 4.5 Sección transversal de la muestra, respecto a la dirección de laminación.

Luego se realizó el encapsulado de la muestra para mejorar la manipulación de la misma. Para ello se recubren las muestras con un polímero denominado baquelita en una prensa de montaje en caliente de la marca Struers modelo LaboPress-1, calentando la resina a 180° y manteniendo la temperatura durante 5 minutos aplicando una presión de 25kN, posteriormente el tiempo de enfriamiento fue de 3 minutos. Este proceso también se puede realizar en frío usando resinas especiales de secado rápido.

Luego, se procede al desbaste y pulido de las muestras, lo cual se realizó en una pulidora de la marca Struers modelo LaboPol-1 mostrada en la figura 4.6, se desbastó la superficie que será objeto de estudio con ayuda de varios grados de lijas de carburo de silicio, empezando con 220, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400 y 4000. Enseguida se continúa con el pulido fino, en el cual se utilizó alúmina (Al_2O_3) con un tamaño de partícula de 0.3 μm sobre un paño suave húmedo hasta darle un acabado espejo a las muestras.



Figura 4.6 Pulidora Struers modelo LaboPol-1.

Posteriormente, se realizó el ataque químico, luego de que la muestra es pulida convenientemente, se ataca con reactivos químicos apropiados. Estos reactivos dependen del tipo de material que se desea atacar y el tipo de fase que se desea observar.

En este trabajo los ataques químicos fueron realizados por inmersión, el cual consiste en exponer la muestra a una solución reactiva por contacto directo durante un tiempo determinado. Para el acero doble fase (DP) el ataque químico se realizó, utilizando el reactivo Picral y Nital como agente de ataque, en un tiempo de 20 segundos y 25 segundos, respectivamente. Para el acero parcial martensítico (PM) se utilizó Nital como agente de ataque, en un tiempo de 20 segundos, se dejó caer la disolución sobre la superficie pulida con ayuda de un gotero, una vez completado el tiempo de inmersión y revelada la microestructura se enjuagó la pieza con abundante agua.

Ataques químicos para aceros alta resistencia			
Acero	Ataque	Reactivo	Tiempo (s)
DP600	Inmersión	4gr ácido Picrico 96ml Etanol	20
		2ml Ácido Nítrico 98ml Etanol	25
PM590	Inmersión	2ml Ácido Nítrico 98ml Etanol	20

Tabla 4.3 Ataques químicos por inmersión para aceros DP600 y PM590 [27].

Finalmente, para observar la microestructura de cada una de las muestras se llevaron a un microscopio óptico y se observan a diferentes aumentos.

Para realizar el análisis microestructural de las muestras se utilizó un microscopio óptico Nikon modelo FX-35WA, con lentes de aumento de 50x, 100x, 200x, 400x y un analizador de imágenes Clemex Vision para tomar las micrografías (figura 4.7), con el objetivo de observar el tamaño de grano, así como la distribución de las fases presentes en cada uno de los aceros. Las

muestras fueron observadas y se tomaron imágenes a 400 magnificaciones, debido a que ambos aceros presentaron tamaños de grano pequeños.



Figura 4.7 Microscopio óptico Nikon modelo FX-35WA.

4.3.3 ENSAYOS DE DUREZA Y MICRODUREZA

Una manera de cuantificar la dureza de un material es medir la resistencia que opone la superficie de un material a ser penetrada por un objeto duro. Puede definirse como una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. La resistencia se determina introduciendo un cuerpo en forma esférica, cónica o piramidal, por el efecto que produce una fuerza determinada durante cierto tiempo en el cuerpo a ensayar.

Existen distintos métodos para medir la dureza de los materiales, pero de acuerdo con la norma ASTM E18-00 y ASTM E92-00, en este trabajo se ha utilizado el procedimiento de dureza Rockwell y Vickers.

4.3.3.1 DUREZA ROCKWELL

Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo 120°, y para los semiduros y blandos una esfera de acero de 1/16", deduciéndose la fuerza Rockwell de la profundidad conseguida en la penetración. El cuerpo empleado para la penetración se hace incidir sobre la superficie de la pieza a ensayar, luego se aplica la carga a través de un sistema de palanca de carga 150 Kg al cono y 100 Kg a la esfera de acero, después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga, posteriormente se mide la profundidad de penetración que queda y en la escala del aparato se lee directamente la dureza correspondiente ya sea Rockwell C (H_{RC}) o la Rockwell B (H_{RB}). Una impresión poco profunda en un material duro dará un número grande tanto que una impresión profunda en un material blando dará un número pequeño [30].

En este trabajo, para determinar la dureza de los aceros DP600 y PM590, los ensayos se realizaron cumpliendo con la norma ASTM E18-00, se utilizó un durómetro Rockwell marca Wilson modelo series 500 (figura 4.8). Se seleccionó la escala Rockwell B, la cual utiliza un indentador esférico de 1/16 pulgadas de diámetro y una carga de 100Kgf (Tabla 4.4). Para cada acero, se realizaron diez indentaciones aleatoriamente en la superficie de cada una de las muestras, y se calculó el promedio de todas las medidas, el resultado representa la dureza del material.

Ensayo de dureza Rockwell B		
Acero	Carga (Kg)	Indentador
DP600	100	Esfera
PM590		1/16"

Tabla 4.4 Ensayo de dureza Rockwell.



Figura 4.8 Durómetro Wilson modelo series 500.

Es importante tomar en cuenta que la superficie del material debe estar lisa, seca y libre de grasa y polvo; el espesor de la muestra debe ser por lo menos diez veces la profundidad de la huella, y el ensayo no es válido si en la cara posterior a la del ensayo aparece un defecto, y la aplicación de la carga debe hacerse de manera perpendicular a la superficie de la muestra.

4.3.3.2 MICRODUREZA

El ensayo de dureza Vickers (HV) utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide cuadrangular, cuyas caras opuestas forman entre sí un ángulo de 136° . La dureza Vickers se define como la carga dividida entre el área de la superficie de indentación. El área de la superficie de indentación se calcula a partir de mediciones microscópicas de las longitudes de las diagonales de impresión. Esta técnica es considerada como ensayo de microdureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del indentador [31].

Para determinar la dureza Vickers de los aceros DP600 y PM590, se utilizó un microdurómetro marca Shimadzu, modelo HMV-2T (Figura 4.9), en el cual se utiliza como indentador una pirámide de diamante y se aplicó una carga de 0.3 Kgf durante un tiempo estándar de 15 segundos, la medición se realizó en diez puntos seleccionados aleatoriamente en la superficie de cada una de las muestras y se calculó el promedio de estas mediciones, el resultado representa la microdureza del material. Las indentaciones se realizaron en la sección transversal de acuerdo a la norma ASTM E92-00.

Para llevar a cabo el ensayo, se requirió que la superficie de la muestra estuviese correctamente pulida y atacada químicamente, lo que permite seleccionar el lugar concreto de ejecución de la huella. Además, debe existir una buena tolerancia de planicidad entre esta superficie y la de apoyo de la muestra. De este modo se pretende asegurar que la pirámide cuadrangular penetre en el material en dirección perpendicular al mismo, evitando así falsear las medidas de las huellas producidas. Es muy importante que la carga se aplique y se retire suavemente sin golpes o vibraciones. Además es vital que la punta del penetrador este en buen estado por ésta razón se recomienda verificarla periódicamente para evitar fallas.

Ensayo de dureza Vickers		
Acero	Carga (Kg)	t (s)
DP600	0.3	15
PM590		

Tabla 4.5 Ensayo de dureza Vickers.



Figura 4.9 Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.

4.3.4 ENSAYO DE TENSION

El ensayo de tensión permite obtener información de las propiedades mecánicas de un material, mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada en una probeta. Lo más importante del ensayo de tensión es obtener la curva de fluencia del material. También se mide la elongación del material en la probeta por la aplicación de la fuerza en la longitud calibrada. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza, que se conoce como carga, hasta que se produce la rotura de la probeta [28].

En este trabajo fueron utilizadas probetas rectangulares y las dimensiones de las probetas fueron de 17 mm de longitud y 2 mm de ancho, como se muestra en la figura 4.10. Posteriormente fueron medidas cada una de las probetas utilizando un vernier digital marca Mitutoyo para tener la medición exacta de la longitud, ancho y espesor de cada una de ellas.

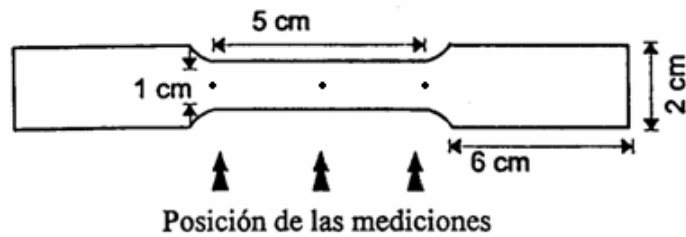


Figura 4.10 Dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos de tensión.

Las probetas se cortaron a 0° , 45° y 90° con respecto a la dirección de laminación, con la finalidad de obtener la relación de deformación plástica promedio bajo el estándar ASTM E517. Una vez cortadas las probetas fueron limadas en los bordes usando papel de lija de carburo de silicio 220, para evitar concentraciones de esfuerzos en estos puntos.

Para determinar las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 se realizaron ensayos de tensión uniaxiales, en cumplimiento con la norma ASTM E8-00. Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina universal servo-hidráulica marca Instron modelo 8502 (Figura 4.11) de 10 toneladas de capacidad máxima de carga. Se realizaron 27 ensayos de tensión a cada uno de los aceros estudiados (DP600 y PM590) teniendo un total de 54 probetas ensayadas. Los ensayos de tensión se realizaron a temperatura ambiente (28°C), variando la dirección respecto a su laminación se analizaron probetas a 0° , 45° y 90° . Además los ensayos de tensión se realizaron a velocidades constantes de desplazamiento del cabezal de 10mm/min, 100mm/min y 1000mm/min, equivalentes a velocidades de deformación inicial de 0.003s^{-1} , 0.03s^{-1} y 0.3s^{-1} , respectivamente. Las velocidades de cabezal se determinaron en base a la experiencia, estudios previos y asesoría por parte del personal técnico, haciendo variar dicha velocidad en un orden de magnitud hasta la capacidad máxima de la máquina.



Figura 4.11 Máquina universal de pruebas marca Instron modelo 8502.

En la figura 4.12 se muestra el diseño de experimentos, para cada uno de los aceros se manejaron probetas a 0,45 y 90 grados, y las velocidades de cabezal fueron de 10 mm/min, 100 mm/min y 1000 mm/min para cada una de las direcciones, con un factor de repetitividad de tres en cada condición. Se seleccionó el valor medio de los resultados obtenidos.

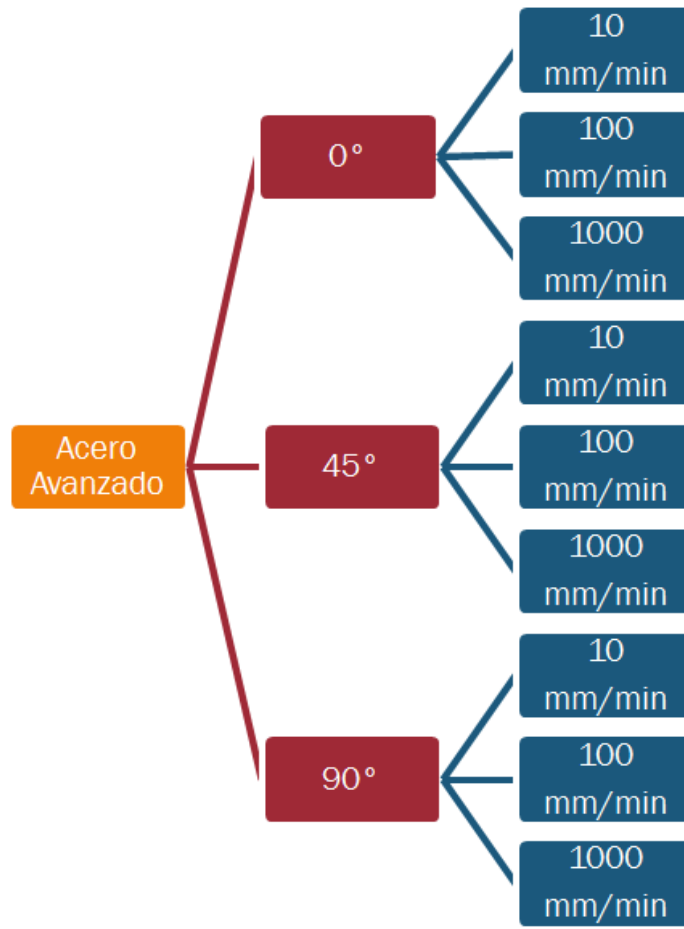


Figura 4.12 Diseño de experimentos para ensayos de tensión.

Una vez realizados los ensayos de tensión se realizó la medición de las probetas deformadas. Mediante un vernier digital se obtuvieron las dimensiones de longitud entre marcas, ancho y espesor en el área de fractura de la probeta.

4.3.5 ANÁLISIS POR SIMULACIÓN

El método de elemento finito, es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales que describen un problema físico normalmente mediante el uso de paquetes computacionales. El método se basa en dividir la geometría del sólido de interés, en pequeños elementos en los cuales y para cada uno de ellos, se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a una variable de interés como por ejemplo, la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el perfil de velocidades en mecánica de fluidos, etc. en forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La solución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que converge una solución [34].

Otro ejemplo es la simulación de impacto de un vehículo con la cual se puede estimar la eficiencia de la estructura del chasis sin necesidad de realizar pruebas reales. Ver figura 4.13 [5].



Figura 4.13 Ejemplo simulación de impacto de un vehículo, imagen superior simulación, imagen inferior prueba real, se observa el parecido del resultado final de la deformación entre ambas imágenes [5].

El método de elemento finito, supone que el comportamiento mecánico de un continuo, está conformado por un número finito de partes o elementos, sobre esas partes o elementos son consideradas las propiedades del material (modulo de Young, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, etc.) y las relaciones constitutivas (las curvas de flujo del material), donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre sí por una serie de puntos representativos llamados nodos, localizados en sus contornos. El conjunto de nodos y elementos se llama malla. Los cálculos se realizan sobre esta malla, lo que se representa en un sistema de ecuaciones llamado matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos [5,35].

Se realizó la simulación de un proceso de compresión (mediante el paquete genérico comercial Abaqus versión 6.9) para obtener el esfuerzo máximo de una pieza tubular de 576.22 mm de largo y de 3.5 mm de espesor, dicha pieza se muestra en la figura 4.14. La pieza se simuló entre dos paredes sólidas, de las cuales una está fija y la otra ejerce el movimiento a una velocidad de 10 m/s hasta alcanzar una deformación máxima en la longitud de la pieza, con un tiempo de choque de 0.0125 segundos, en la compresión la fricción fue despreciada, estas condiciones se basan en la investigación realizada por Gameiro [32].

Gameiro [32] realizó un análisis de elemento finito en tubos de aluminio con distinto diámetro interior (D), espesor (t) y longitud (L), dichos tubos fueron sometidos a un proceso de compresión entre dos paredes rígidas, de las cuales una esta fija y la otra se mueve a una velocidad de 10 m/s, despreciando la fricción, utilizó un modelo dinámico, con un tipo de elemento cascaron de 8 nodos.

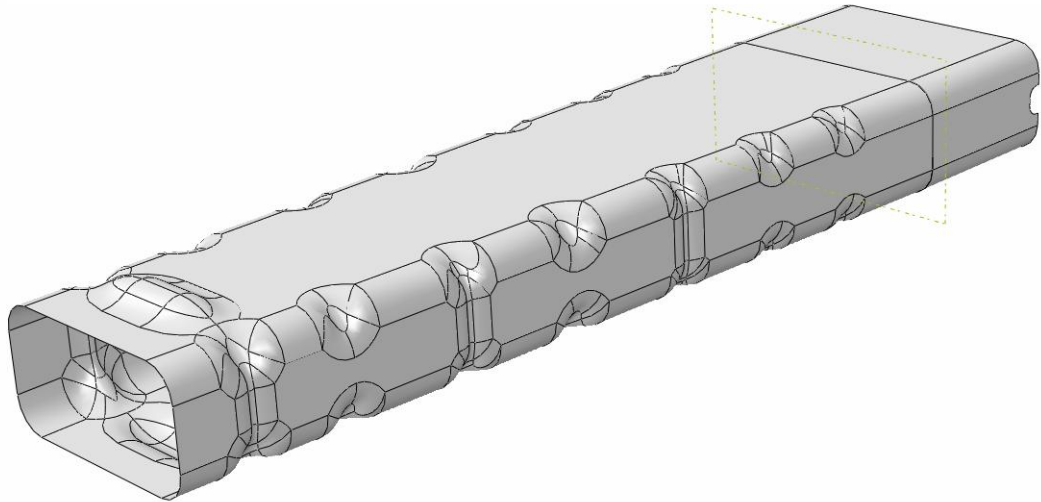


Figura 4.14 Diseño de pieza tubular.

El análisis fue realizado con los datos obtenidos de las curvas de fluencia a velocidad de cabezal de 10 mm/min de los aceros DP600 y PM590, los datos empleados para el acero HSLA grado 35 fueron proporcionados por la empresa Metalsa S.A. de C.V., con la finalidad de conocer el comportamiento de la pieza durante su función estructural, es decir, al momento en que ocurra un impacto frontal en un automóvil y realizar una comparación con el acero HSLA grado 35, que es el material con el que actualmente se fabrica la pieza tubular.

Se realizó la simulación de la compresión de la pieza tubular donde se utilizó un modelo dinámico explícito, con un tipo de elemento cascaron de 4 nodos, la maya del modelo fue conformada por un total de 27501 nodos y 27545 elementos.

Los elementos cascaron son usados para modelar estructuras en las cuales una dimensión (espesor), es significativamente mas pequeño que el resto de las otras dimensiones [35].

En la figura 4.15 se muestra la pieza entre las paredes sólidas para llevar a cabo el proceso de compresión mediante simulación por elemento finito.

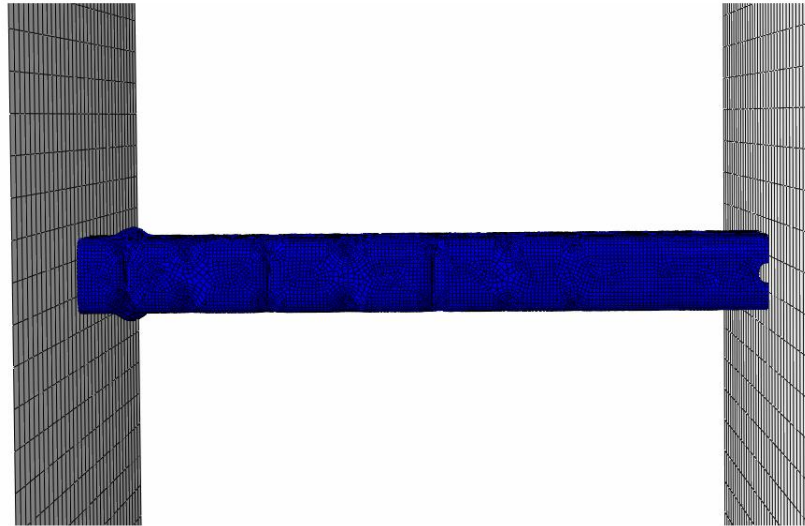


Figura 4.15 Pieza tubular entre paredes sólidas.

La pieza tubular se utiliza para soportar la defensa frontal, parte de la cabina y un travesaño, además absorbe la energía durante los impactos frontales al momento de un choque, por esta razón es que la pieza se sometió a un proceso de compresión. En la figura 4.16 se muestra la ubicación de la pieza en el chasis de un automóvil.

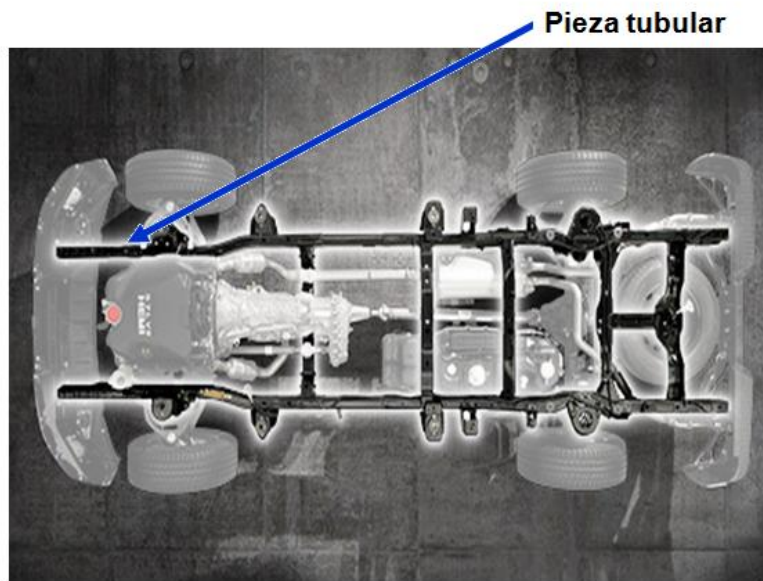


Figura 4.16 Ubicación en el chasis de la pieza tubular.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se presentan y se discuten los resultados obtenidos del procedimiento experimental descrito en el capítulo 4.

5.1 ANÁLISIS QUÍMICO

Del análisis químico realizado a cada una de las muestras se obtienen los resultados mostrados en las tablas 5.1 y 5.2. Además se presenta la composición química nominal para los aceros estudiados proporcionada por el proveedor.

DP600		
Elemento	% Peso	nominal
C	0.070	0.078
S	0.006	0.006
Mn	0.990	1.018
P	0.038	0.039
Si	0.130	0.141
Cr	0.430	0.422
Ni	0.040	0.019
Mo	0.030	0.001
Cu	0.015	0.011
Al	0.058	0.047
V	0.018	-
Nb	0.004	0.001
Ti	0.005	0.002
N		0.004

Tabla 5.1 Composición química experimental acero DP600.

En el acero DP600 la composición de los elementos C, S, P, Si, Cr, Cu, Al, V, Nb, Ti y N se encuentran dentro de la composición nominal, el resto de los elementos como Mn, Ni, y Mo están fuera de rango con respecto a la composición nominal, sin embargo su diferencia porcentual se desprecia debido a que es muy pequeña. Esta diferencia pudo no haber sido detectada con exactitud, debido a la superficie de la muestra o al no estar calibrado el equipo correctamente, pero como esta diferencia es muy pequeña se considera que la composición del acero DP600 está dentro de la composición nominal. Como la clasificación no es por composición química sino por propiedades mecánicas, las diferencias no son importantes si el material cumple con las propiedades mecánicas. Este acero presenta bajo contenido de carbono (0.07%).

El carbono tiene el mayor efecto en las propiedades del acero, es el principal elemento endurecedor en todos los aceros. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tensión, incrementa la fragilidad del acero, aumenta la dificultad para soldar el acero, disminuye la tenacidad, disminuye la ductilidad y baja el punto de fusión del acero. El porcentaje de elongación y reducción de área disminuye al aumentar el porcentaje de carbono en el acero así mismo también disminuye la resistencia al impacto. La resistencia a la tensión, la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la elongación dependen principalmente del porcentaje de carbono que contienen los aceros y de los otros aleantes.

PM590		
Elemento	% Peso	nominal
C	0.080	0.083
S	0.002	0.001
Mn	1.520	1.470
P	0.017	0.010
Si	0.090	0.080
Cr	0.060	-
Ni	0.040	-
Mo	0.030	-

Cu	0.017	-
V	0.016	-
Nb	0.037	-
Ti	0.005	-
W	0.002	-

Tabla 5.2 Composición química experimental acero PM590.

En el acero PM590 los elementos tales como C, S, P, Si, Cr, Ni, Mo, Cu, V, Nb, Ti, y W están dentro de la composición nominal, el Mn está ligeramente arriba de la composición nominal, pero como esta diferencia es muy pequeña se considera que la composición del acero PM590 está dentro de la composición nominal. El Mn es un formador de austenita, y al combinarse con el azufre previene la formación de sulfuro de hierro en los bordes de grano, altamente perjudicial durante el proceso de laminación. También se usa para desoxidar y aumentar la capacidad de endurecimiento. Al aumentar el % de Mn en el acero, se aumenta ligeramente su resistencia y se mejora su templabilidad. Este acero presenta bajo contenido de carbono (0.08%). El acero estudiado PM590 es una modificación realizada a un acero martensítico que no se encuentra estandarizada actualmente.

5.2 ANÁLISIS METALGRÁFICO

En las figuras 5.1 y 5.2 se presentan las fotomicrografías de los aceros DP600 y PM590 respectivamente. El análisis fue realizado en condiciones iniciales de la cara transversal de la muestra, las imágenes fueron obtenidas a 400X, donde se observaron tamaños de grano distintos para cada uno de los aceros. El tamaño de grano medio se determinó por el método de comparación de las cartas estándar según la norma ASTM E112, este involucra la comparación de la estructura de grano con una serie de imágenes graduadas. El microscopio óptico cuenta con un ocular especial para la medición de tamaño de grano, donde se visualizan distintas plantillas de comparación. El círculo exterior tiene un diámetro de 175mm, y debe coincidir con el borde de la imagen de la fotomicrografía para respetar las

magnificaciones. El número de cada plantilla corresponde al tamaño de grano “G” si se está observando la muestra a una magnificación de 100X. En caso de utilizar otra magnificación debe corregirse este valor mediante la suma del factor de corrección Q [37].

Magnificación M	Factor de corrección Q (para Mb=100X)
50X	-2
100X	0
200X	2
400X	4

Según las tablas de comparación de la ASTM, el acero DP600 tiene un tamaño de grano promedio ASTM de 9.5 (13.3 μ m) y el acero PM590 tiene un tamaño de grano promedio ASTM de 12 (6 μ m). A menor tamaño de grano, mayor resistencia mecánica, debido a que las dislocaciones tendrán menor movilidad al estar impedido su movimiento. Entre más fino sea el tamaño de grano más duro es el material, además son menos susceptibles al agrietamiento.

Por medio del microscopio óptico se calculó el porcentaje de fase martensítica dentro de la matriz ferrítica en cada uno de los aceros estudiados, donde en el acero DP600 se obtuvo 22% de la fase martensita dentro de la matriz de ferrita, y en el acero PM590 se obtuvieron valores alrededor del 30% de martensita dentro de la matriz ferrítica.

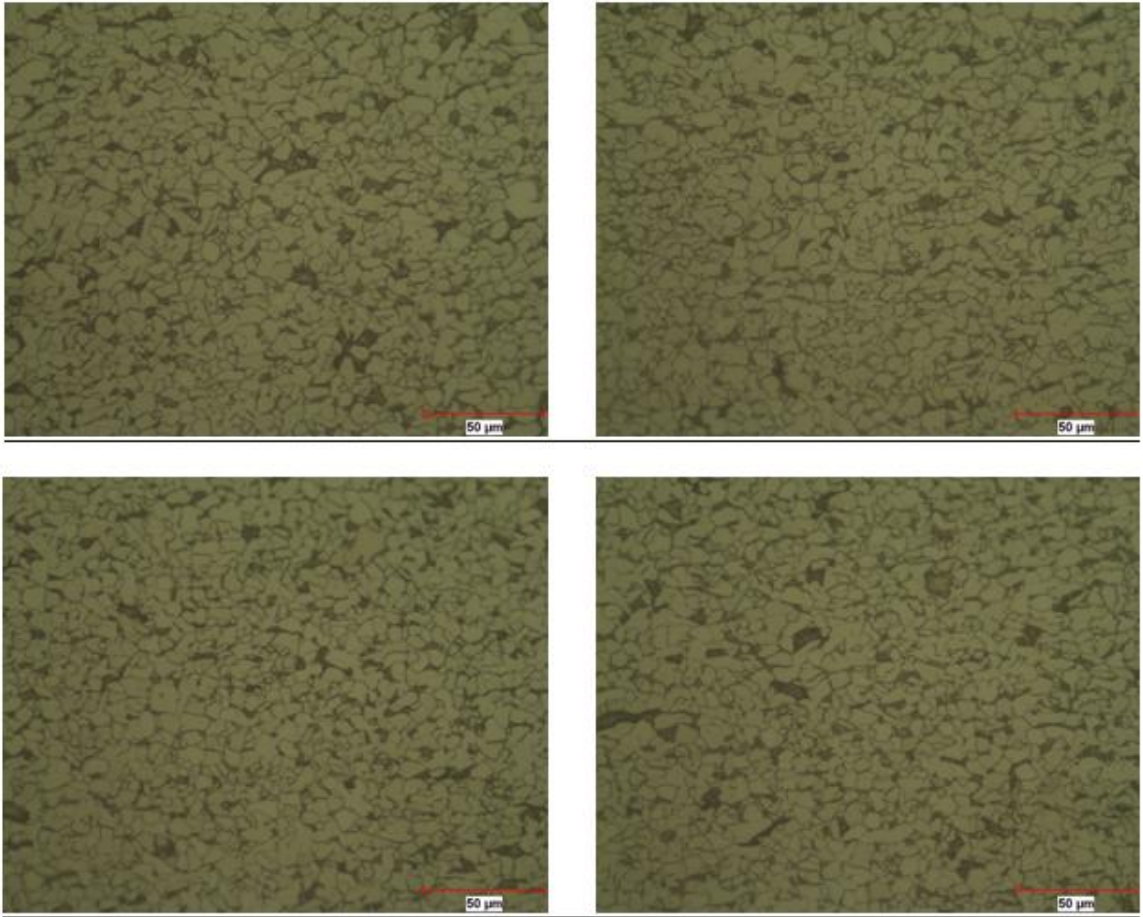


Figura 5.1 Fotomicrografía del acero DP600 a 400X, revela un tamaño de grano promedio ASTM de 9.5 ($13.3\mu\text{m}$), las zonas oscuras muestran la fase martensítica dentro de la matriz ferrítica.

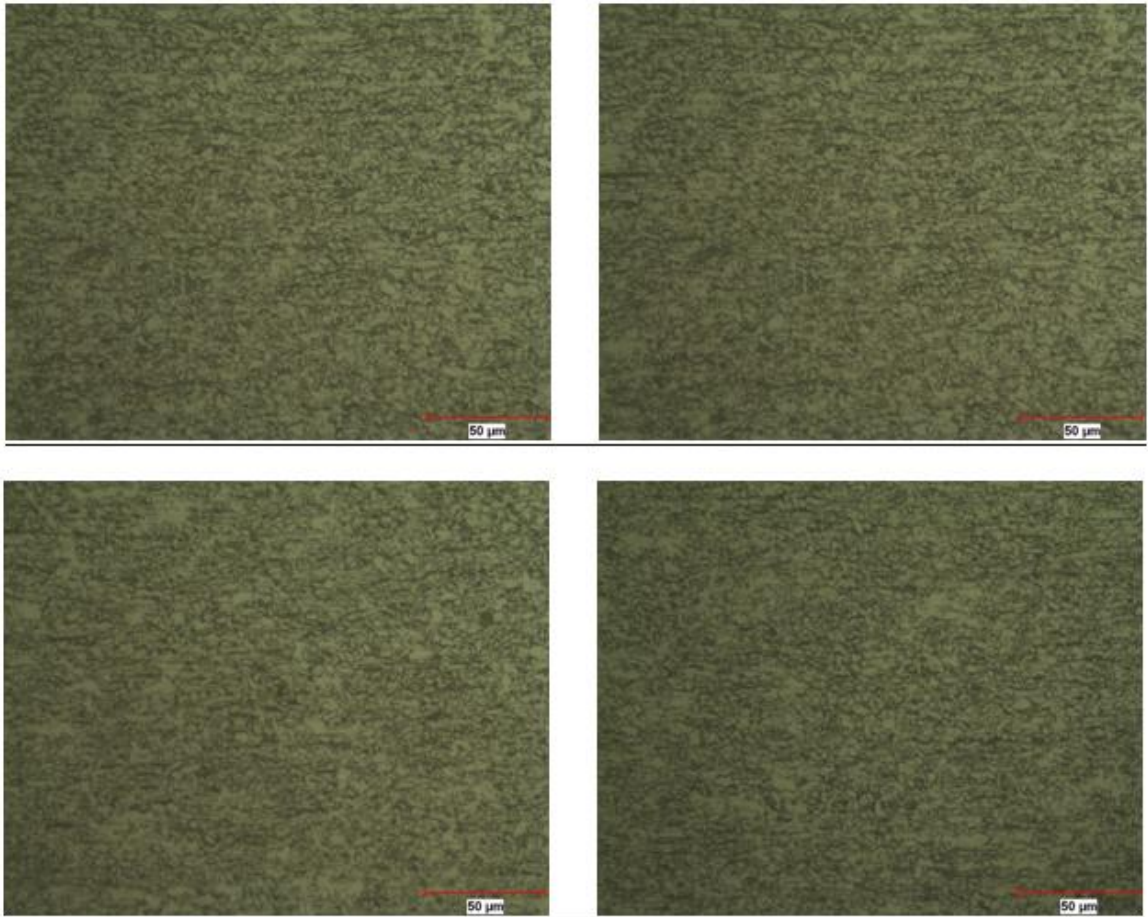


Figura 5.2 Fotomicrografía del acero PM590 a 400X, revela un tamaño de grano promedio ASTM de 12 ($6\mu\text{m}$), las zonas oscuras muestran el alto contenido de martensita dentro de la matriz ferrítica.

5.3 ENSAYOS DE DUREZA Y MICRODUREZA

5.3.1 ENSAYO DE DUREZA

La dureza del acero se determinó con el promedio de las lecturas registradas de cada muestra, los resultados se muestran a continuación en la tabla 5.3.

Resultados dureza Rockwell B		
INDENTACIÓN	DP600	PM590
1	83	87
2	83	88
3	88	88
4	85	88
5	83	90
6	88	88
7	88	90
8	90	90
9	88	90
10	90	87
Promedio	87	89

Tabla 5.3 Resultados dureza Rockwell B de aceros DP600 y PM590.

5.3.2 ENSAYO DE MICRODUREZA

La dureza Vickers se determinó con el promedio de las lecturas registradas de cada muestra, los resultados se muestran a continuación en la tabla 5.4.

Resultados dureza Vickers		
INDENTACIÓN	DP600	PM590
1	208	234
2	190	228
3	194	235
4	220	229
5	196	229
6	202	221
7	212	230
8	189	235
9	200	216
10	195	237
Promedio	201	230

Tabla 5.4 Resultados dureza Vickers de aceros DP-600 y PM-590.

5.4 ENSAYO DE TENSIÓN

El esfuerzo de cedencia (σ_y) de los ensayos de tensión fue obtenido a 0.002 de la deformación verdadera (ϵ), esto se realizó trazando una pendiente paralela a la región elástica de la curva a deformación de 0.002. El porcentaje de elongación (%EI) del material fue obtenido a la fractura.

El modulo elástico o de Young (E) no fue calculado debido a que actualmente la máquina universal de pruebas no cuenta con un extensómetro y el resultado teórico obtenido no sería representativo para estos aceros.

El exponente de endurecimiento por deformación (n) es una medida del aumento de la dureza y la resistencia causada por la deformación plástica, el coeficiente de resistencia (K) es una medida de que tan resistente es un material, es una constante experimental, calculada del ajuste de los datos de la curva esfuerzo deformación, que es numéricamente igual al valor extrapolado del esfuerzo verdadero en una deformación verdadera de 1.0 [38]. Estos valores se obtienen determinando la ecuación de la gráfica del logaritmo del esfuerzo verdadero contra el logaritmo de la deformación verdadera, donde n es la pendiente y K es la intersección con el eje y, estas propiedades se basan en la ecuación de Hollomon (ver Apéndice A, ecuación 7).

El rango de la curva que se encuentra entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo último, es aquel en el que el adelgazamiento de la probeta se considera crítico y debido a la ausencia del extensómetro el esfuerzo último se presenta como una aproximación al esfuerzo último real.

Las ecuaciones para determinar las curvas esfuerzo deformación verdadera se encuentran en el Apéndice A.

En los ensayos de tensión a velocidad de cabezal de 10mm/min, se obtuvo la curva esfuerzo deformación verdadera para las condiciones de 0°, 45° y 90° para cada uno de los aceros. El acero DP600 presentó un esfuerzo

máximo de 985 MPa y un porcentaje de elongación total de 25% y el acero PM590 un esfuerzo máximo de 962 MPa y su porcentaje de elongación total fue de 21% (se presentan las propiedades mecánicas promedio para cada uno de los aceros). Las propiedades mecánicas que se obtuvieron del ensayo de tensión se muestran en la tabla 5.5.

La figura 5.3 muestra las curvas esfuerzo deformación real de los aceros estudiados a velocidad de cabezal de 10 mm/min, en las direcciones de 0°, 45° y 90° con respecto a la dirección de laminación. Cada condición de los ensayos de tensión tuvo una repetitividad de tres, por lo tanto se seleccionó la curva media para cada orientación y esto se realizó para cada uno de los aceros estudiados. Estas consideraciones se aplicaron también a las velocidades de cabezal de 100 mm/min y 1000 mm/min.

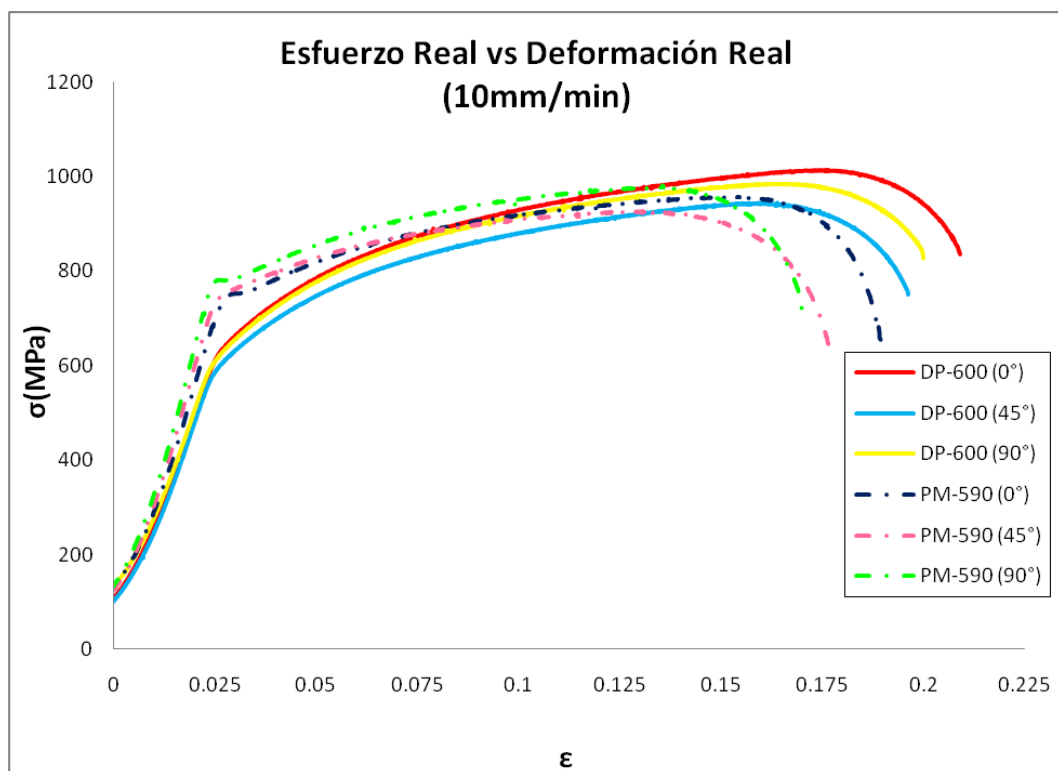


Figura 5.3 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 10mm/min.

Resumen de las propiedades mecánicas DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 10 mm/min							
DP-600	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	623.76	1015.61	835.97	0.23	1567.11	26.01	56.67
45°	618.68	942.96	749.69	0.23	1475.03	23.83	54.76
90°	641.73	984.87	826.55	0.23	1528.27	24.60	54.23
PM-590	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	749.40	961.72	646.21	0.15	1297.78	22.81	64.74
45°	746.81	926.84	634.88	0.14	1238.80	20.91	64.88
90°	781.27	981.23	728.59	0.15	1340.91	20.36	64.54

Tabla 5.5 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 10mm/min.

La segunda condición de velocidad de cabezal fue de 100mm/min, para el acero DP600 se obtuvieron resultados de esfuerzo máximo de 981 MPa y porcentaje de elongación total de 22%, y el acero PM590 un esfuerzo máximo de 973 MPa y un porcentaje de elongación total de 21%.

En la figura 5.4 se muestran las curvas esfuerzo deformación verdadera de los aceros ensayados a velocidad de cabezal de 100 mm/min, en las direcciones de 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación.

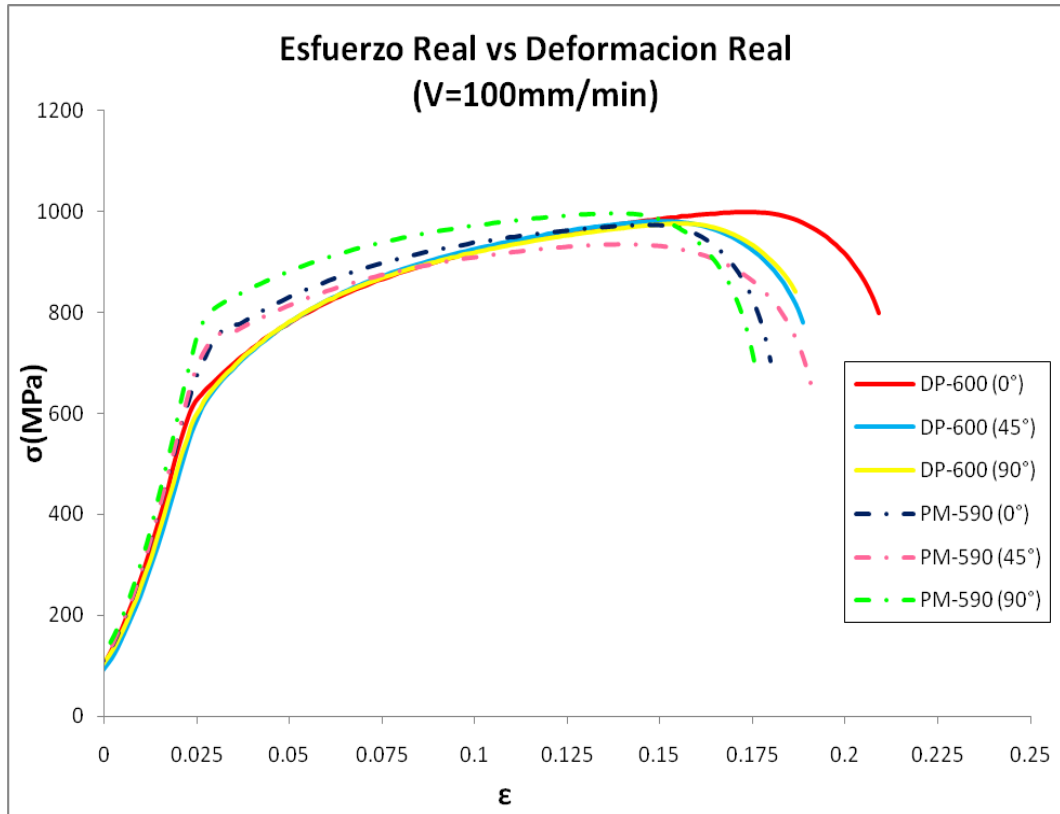


Figura 5.4 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 100mm/min.

Y la tabla 5.6 muestra las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tensión en estas condiciones.

Resumen de las propiedades mecánicas DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 100 mm/min							
DP-600	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	637.95	998.77	798.70	0.23	1531.44	24.97	54.19
45°	647.22	981.17	780.33	0.24	1590.01	22.21	55.71
90°	638.75	976.54	841.19	0.23	1547.39	22.08	53.97
PM-590	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	733.10	972.72	703.21	0.17	1364.27	21.16	64.60
45°	752.96	935.69	652.42	0.15	1280.56	22.54	65.51
90°	799.12	996.81	680.18	0.14	1326.48	20.78	65.80

Tabla 5.6 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 100mm/min.

La tercera condición de velocidad de cabezal fue de 1000mm/min, los resultados obtenidos para el acero DP-600 fueron un esfuerzo máximo de 1012 MPa y un porcentaje de elongación total de 26%, y el acero PM-590 presentó un esfuerzo máximo de 993 MPa y su porcentaje de elongación total fue de 21%.

A continuación en la figura 5.5 se muestran las curvas esfuerzo deformación real de los aceros avanzados sometidos a ensayos de tensión a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.

En la tabla 5.7 se muestra las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tensión a velocidad de cabezal de 1000mm/min.

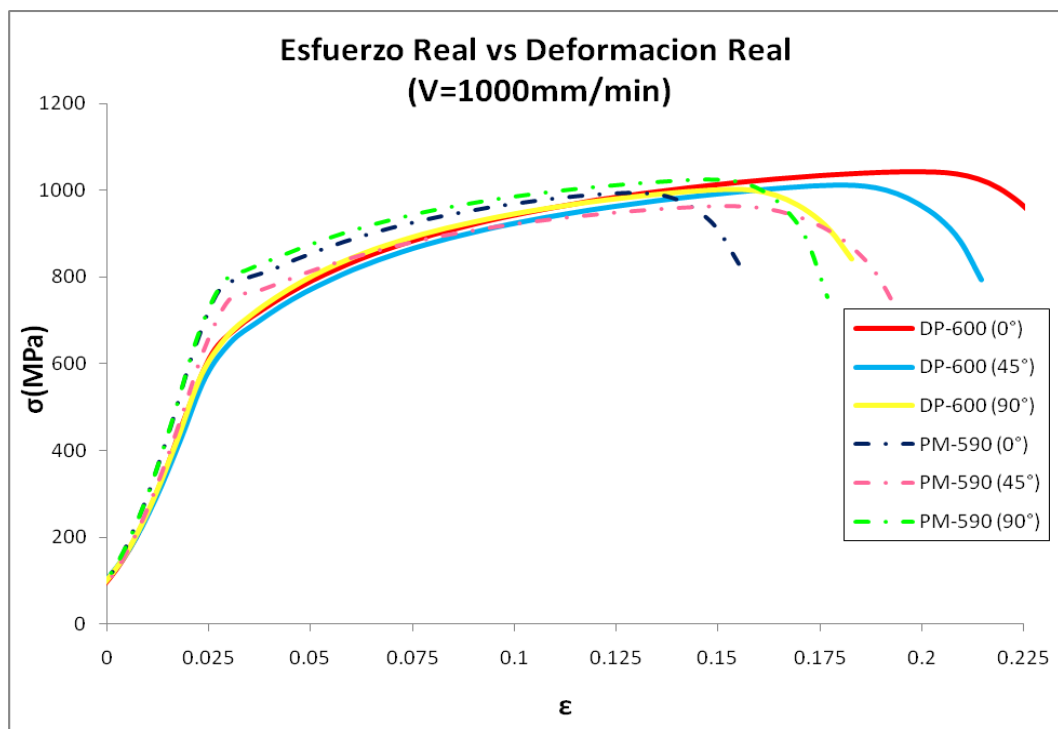


Figura 5.5 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 1000mm/min.

Resumen de las propiedades mecánicas DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 1000 mm/min							
DP-600	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	684.55	1042.96	886.03	0.22	1548.82	27.80	56.28
45°	650.26	1012.35	794.19	0.24	1575.43	26.02	56.31
90°	662.79	1002.31	841.87	0.24	1607.31	21.82	55.70
PM-590	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	771.02	993.04	829.66	0.17	1442.45	17.96	66.41
45°	765.63	964.71	722.09	0.16	1336.29	22.67	64.61
90°	817.56	1024.46	754.01	0.16	1403.14	20.58	67.07

Tabla 5.7 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 1000mm/min.

En esta investigación para seleccionar el acero con mejores propiedades mecánicas se tomo como referencia el esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación. En la tabla 5.8 se presenta un análisis comparativo entre la diferencia porcentual de estas propiedades manteniendo constante el ángulo respecto a la laminación y variando la velocidad de cabezal para cada uno de los aceros estudiados.

Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a ángulo constante.									
Condición		DP-600				PM-590			
°	Vcabezal (mm/min)	σ_{max} (MPa)	Dif (%)	%El	Dif (%)	σ_{max} (MPa)	Dif (%)	%El	Dif (%)
0	10	1015.612	-	26.01	-	961.72	-	22.81	-
0	100	998.77	-1.65	24.97	-3.99	972.72	1.14	21.16	-7.23
0	1000	1042.96	2.69	27.80	6.88	993.04	3.25	17.96	-21.26
45	10	942.96	-	23.83	-	926.84	-	20.91	-
45	100	981.17	4.05	22.21	-6.79	935.69	0.95	22.54	7.79
45	1000	1012.35	7.35	26.02	9.19	964.71	4.08	22.67	8.41
90	10	984.88	-	24.60	-	981.23	-	20.36	-
90	100	976.54	-0.85	22.08	-10.24	996.81	1.58	20.78	2.06
90	1000	1002.31	1.77	21.82	-11.30	1024.46	4.40	20.58	1.08

Tabla 5.8 Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a ángulo constante.

Para cada uno de los aceros estudiados se comparó la diferencia porcentual del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación, la cual se obtiene tomando como punto de referencia la velocidad de cabezal de 10 mm/min respecto a la velocidad de 100 mm/min y a la velocidad de 1000 mm/min, para cada ángulo (0°, 45° y 90°), obteniendo una diferencia ya sea de incremento o decremento para las velocidades de 100mm/min y de 1000mm/min.

El acero DP600 a la condición de velocidad de 1000mm/min mostró que la mayor diferencia absoluta es de 11.30 y el acero PM-590 presentó la mayor diferencia absoluta de 21.26 a la misma condición de velocidad de cabezal. Sin embargo el resto de las condiciones no exceden el 10% en diferencia absoluta de porcentajes del esfuerzo máximo y de elongación. Respecto al esfuerzo de cedencia (σ_y), exponente de endurecimiento por deformación (n), coeficiente de consolidación (K) y el porcentaje de reducción de área (%A), la diferencia en porcentaje no es significativa, lo que vuelve a los aceros DP600 y PM590 insensibles a la velocidad de cabezal.

En la tabla 5.9 se presenta el mismo análisis comparativo pero mantenido constante la velocidad de cabezal y variando el ángulo de la probeta.

Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal constante.									
Condición		DP-600				PM-590			
*	Vcabezal (mm/min)	σ_{max} (MPa)	Dif (%)	%EI	Dif (%)	σ_{max} (MPa)	Dif (%)	%EI	Dif (%)
0	10	1015.61	-	26.01	-	961.72	-	22.81	-
45	10	942.96	-7.15	23.83	-8.38	926.84	-3.63	20.91	-8.33
90	10	984.87	-3.02	24.60	-5.42	981.23	2.03	20.36	-10.74
0	100	998.77	-	24.97	-	972.72	-	21.16	-
45	100	981.17	-1.76	22.21	-11.05	935.69	-3.81	22.54	6.52
90	100	976.54	-2.22	22.08	-11.57	996.81	2.47	20.78	-1.79
0	1000	1042.96	-	27.80	-	993.04	-	17.96	-
45	1000	1012.35	-2.93	26.02	-6.40	964.71	-2.85	22.67	26.22
90	1000	1002.31	-3.89	21.82	-21.51	1024.46	3.16	20.58	14.58

Tabla 5.9 Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal constante.

En cada uno de los aceros se tomó como punto de referencia la dirección de la probeta de 0° con respecto a las probetas de 45 y 90°, se obtuvieron las diferencias porcentuales del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación, para las velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min, obteniendo una diferencia de incremento o decremento según sea el caso.

El acero DP600 a la condición de velocidad de 1000 mm/min muestra que la mayor diferencia absoluta que es de 21.51%, y el PM-590 a la condición de velocidad de 1000mm/min muestra que la mayor diferencia absoluta es de 26.22%, las demás condiciones no exceden el 12% en valor absoluto de la diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación.

La diferencia en porcentaje del esfuerzo de cedencia (σ_y), esfuerzo último (σ_u), exponente de endurecimiento por deformación (n), coeficiente de consolidación (K) y del porcentaje de reducción de área (%A) no es significativa, por lo tanto los aceros DP600 y PM590 se consideran insensibles a la orientación en que se deforman.

Otra propiedad que se puede obtener a partir de un ensayo de tensión es la relación de deformación plástica “r” (en una hoja de metal que ha sido deformada por la tensión uniaxial suficientemente para inducir el flujo plástico) es la relación de la deformación verdadera que se ha producido en la dirección del ancho perpendicular a la dirección del esfuerzo aplicado y en el plano de la hoja, simultáneamente a la deformación verdadera en la dirección del espesor (ver ecuación 1) [36].

La relación de deformación plástica (r), es un parámetro que indica la capacidad de las láminas metálicas a resistir el adelgazamiento o engrosamiento al ser sometidas a fuerzas de tensión o compresión en el plano de la lámina, por lo tanto, la relación de deformación plástica indica la uniformidad del material al ser sometido a un proceso de embutido o estampado profundo [36].

La relación de deformación plástica es una medida de la anisotropía plástica y está relacionada con la orientación cristalográfica preferencial en un metal policristalino. La anisotropía es la característica que presenta un material de variar sus propiedades según en la dirección en que sean examinadas [33,36].

En esta investigación es vital determinar la anisotropía de dos aceros avanzados estudiados (DP600 y PM590) debido a que estos posteriormente van a ser sometidos a un proceso de conformado.

La relación de deformación plástica fue obtenida a la fractura de las probetas del ensayo de tensión, midiendo con un vernier digital su ancho y espesor.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la anisotropía promedio [36] se presentan a continuación.

Relación de deformación plástica:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (\text{Ec. 1})$$

Relación de deformación de ancho inicial y final:

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{W_0}{W_i}\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Relación de deformación de espesor inicial y final:

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_0}{t_i}\right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Relación de deformación plástica promedio:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (\text{Ec. 4})$$

Para el acero DP600 el valor de la relación de deformación plástica promedio más elevado fue de 0.51 a la velocidad de cabezal de 10 mm/min, y para el acero PM590 el valor más elevado de anisotropía fue de 0.38 a la velocidad de 10 mm/min.

La figura 5.6 muestra gráficamente la relación de deformación plástica promedio de los aceros DP600 y PM590 a las diferentes velocidad de cabezal.

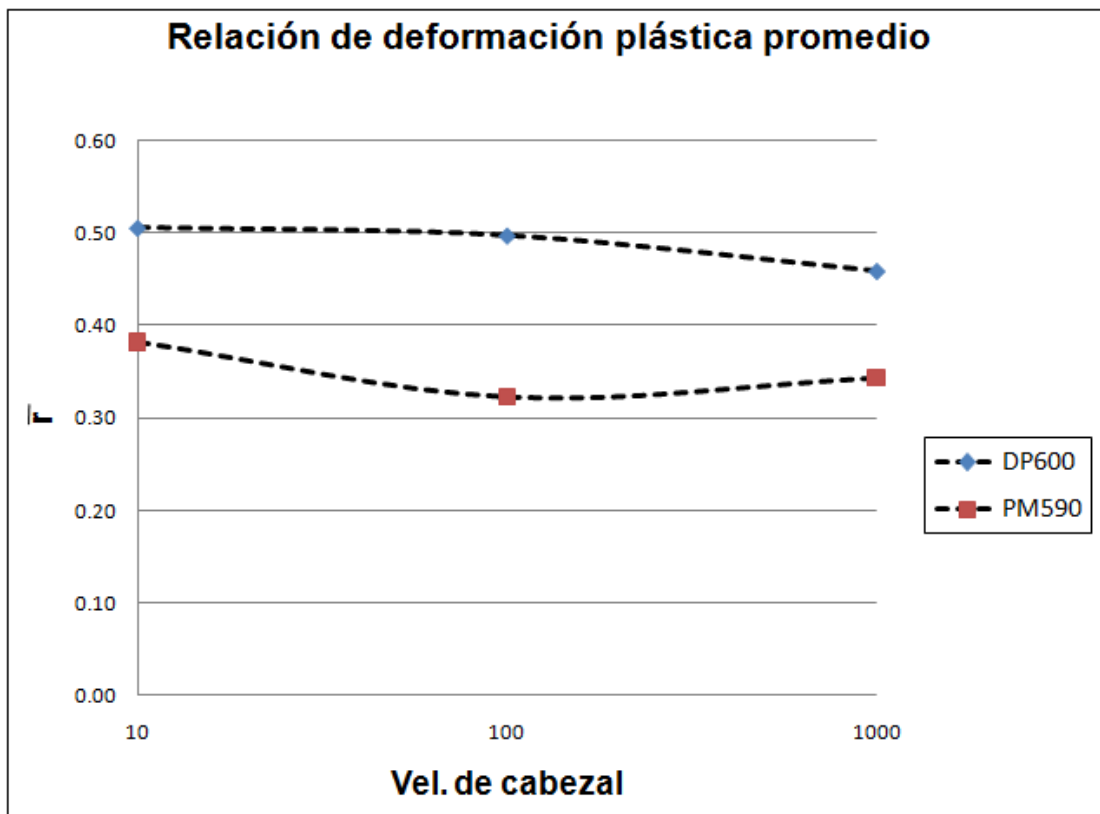


Figura 5.6 Relación de deformación plástica promedio DP600 y PM590 a velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.

El valor de la relación de deformación plástica muestra el grado de conformabilidad de un material, por lo tanto el acero DP600 presenta la conformabilidad más elevada de los aceros de alta resistencia estudiados.

Además, la relación de deformación plástica del acero DP600 a velocidad de cabezal de 10 mm/min fue obtenida al esfuerzo máximo de las probetas del ensayo de tensión, midiendo con un vernier digital su ancho y espesor.

El valor de la relación de deformación plástica más elevado fue de 0.8 a la dirección de laminación de 90°. El valor de la deformación plástica promedio (R) fue de 0.76 a la velocidad de cabezal de 10 mm/min.

La figura 5.7 muestra gráficamente la relación de deformación plástica del acero DP600 a las diferentes direcciones de laminación.

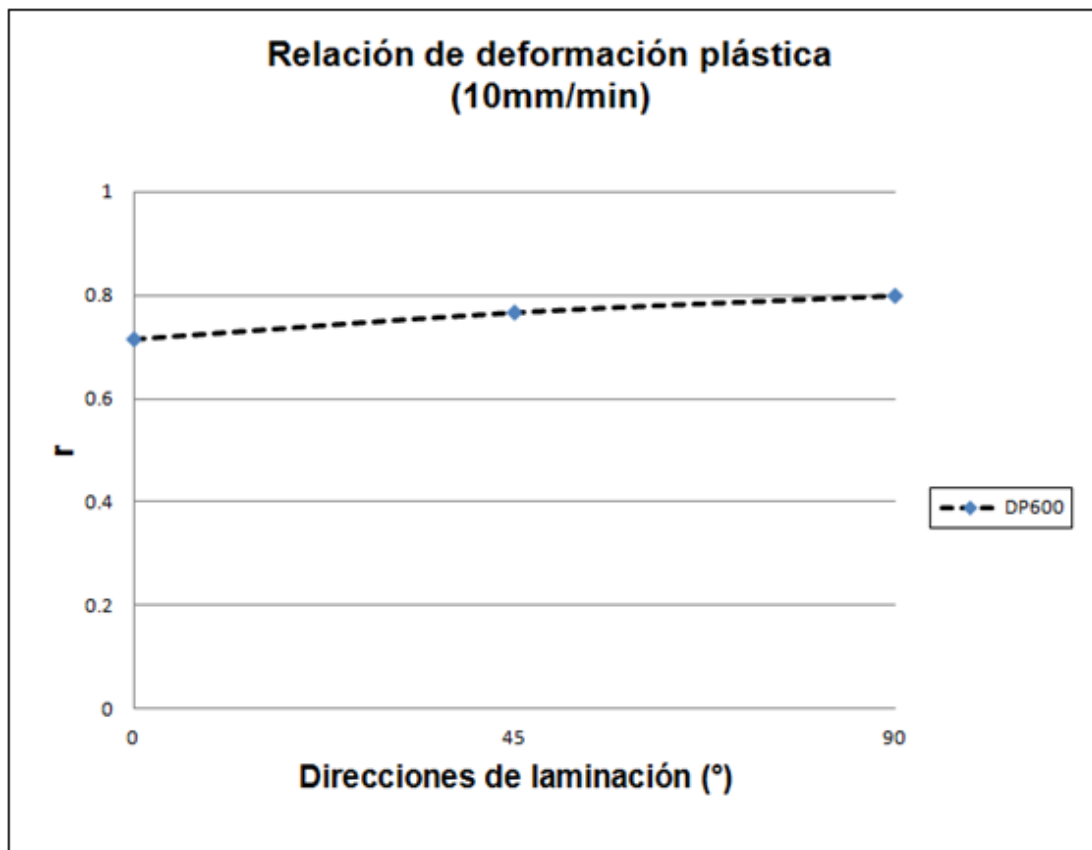


Figura 5.7 Relación de deformación plástica DP600 a velocidad de cabezal de 10 mm/min a las diferentes direcciones de laminación.

5.5 ANÁLISIS POR SIMULACIÓN

En el proceso de impacto para el acero HSLA grado 35, material del cual se manufactura la pieza tubular (la cual es responsable de absorber la energía en un impacto frontal), se obtuvo un esfuerzo máximo de 409.3 MPa y una reducción en su longitud de 347.7 mm, respecto a la longitud original de la pieza, la cual es de 576.22 mm. Es decir, la compresión fue del 60.34% de la pieza. En las figuras 5.7, a la 5.10 se muestra la pieza tubular al finalizar el proceso de compresión.

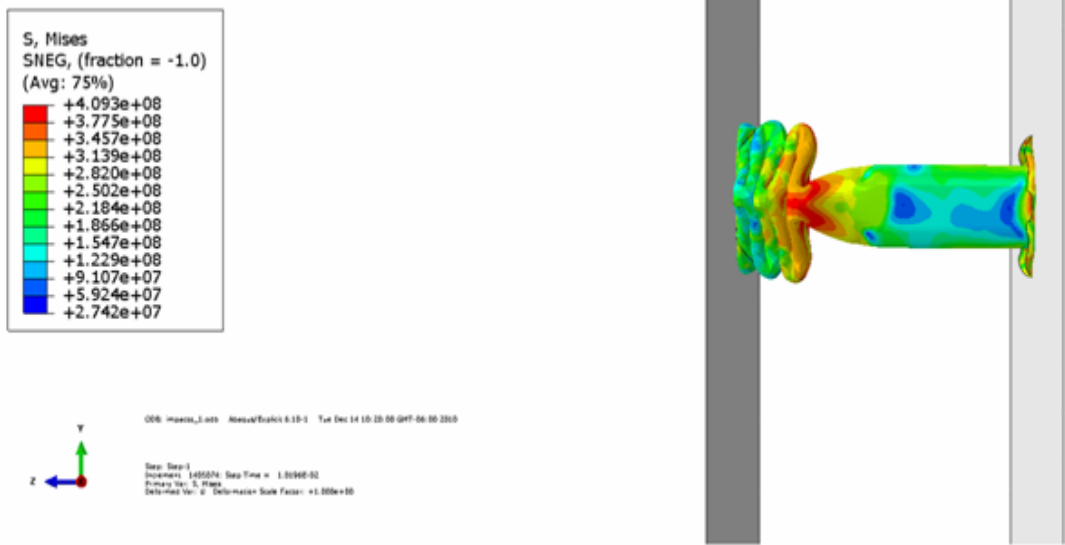


Figura 5.8 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista lateral).

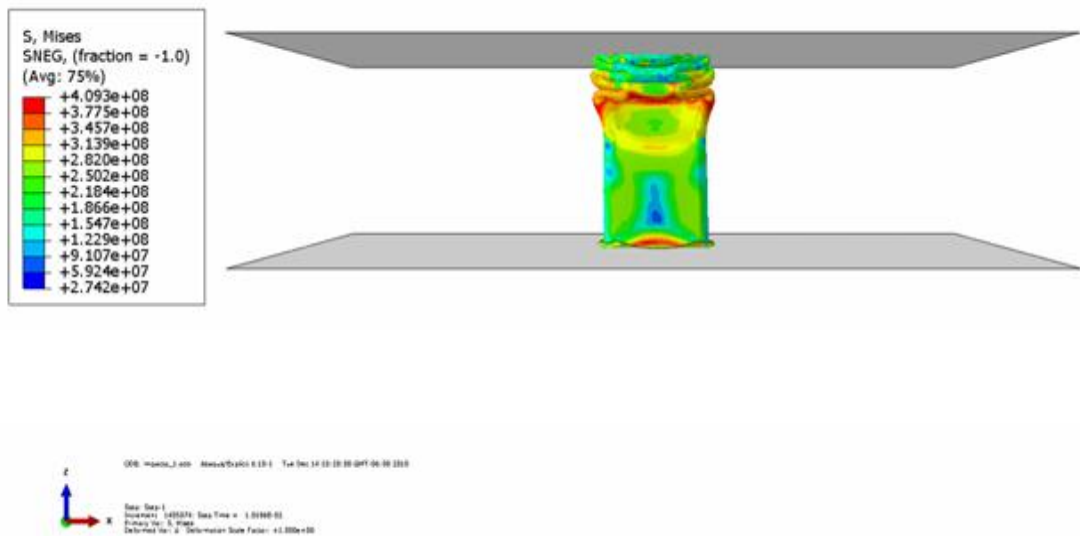


Figura 5.9 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista superior).



Figura 5.10 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista isométrica).

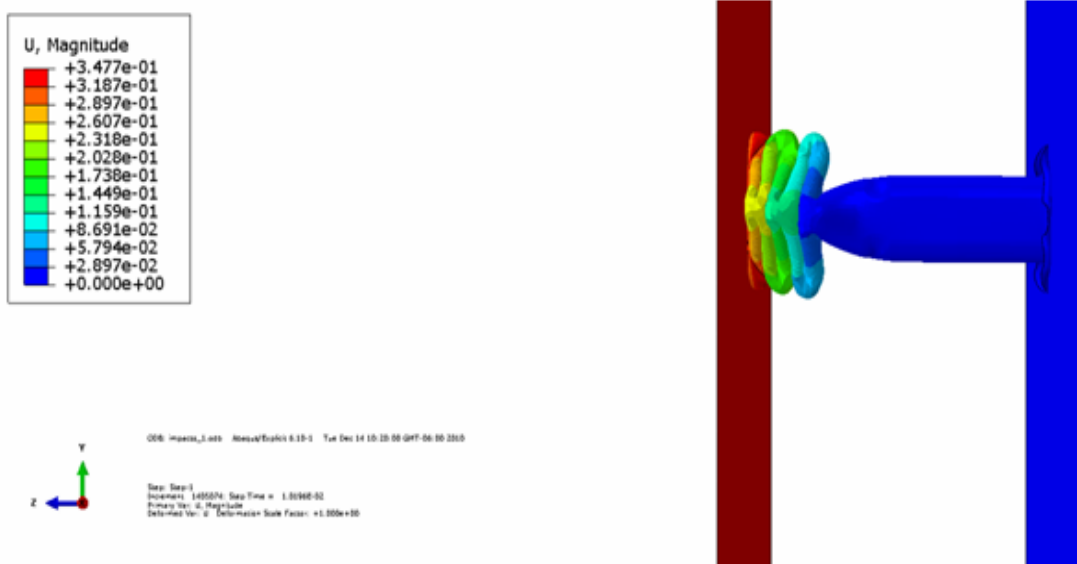


Figura 5.11 Reducción en longitud de 347.7 mm (409 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de HSLA.

El acero DP600 al ser sometido al proceso de compresión alcanzó un esfuerzo máximo de 1012 MPa y una reducción en su longitud de 151.2 mm, equivalente a una compresión de 26.24% de la longitud original de la pieza tubular. En las figuras 5.11, a la 5.14 se muestra la pieza al finalizar el proceso de compresión.

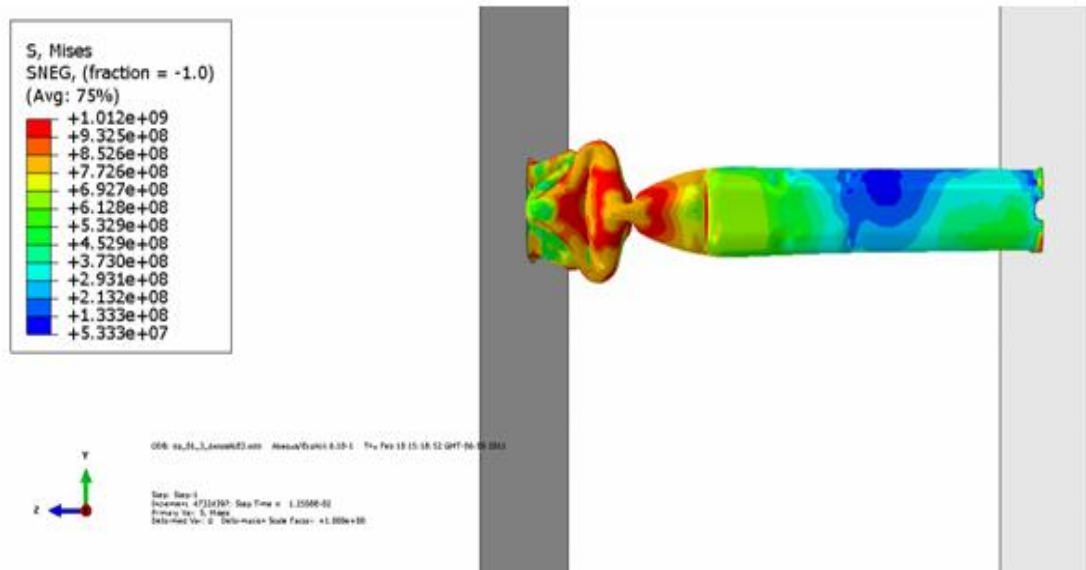


Figura 5.12 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista lateral).

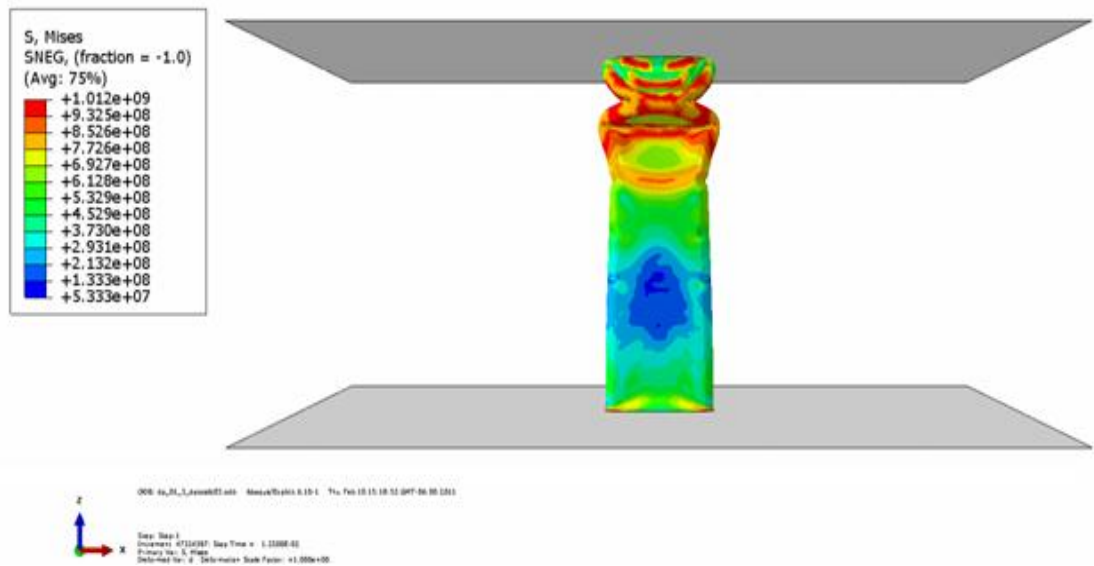


Figura 5.13 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista superior).

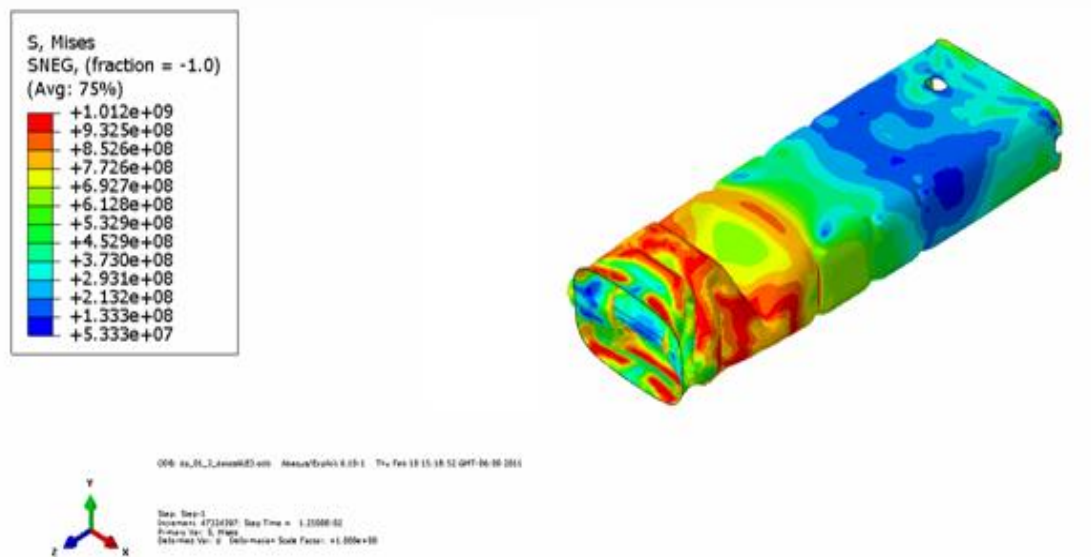


Figura 5.14 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista isométrica).

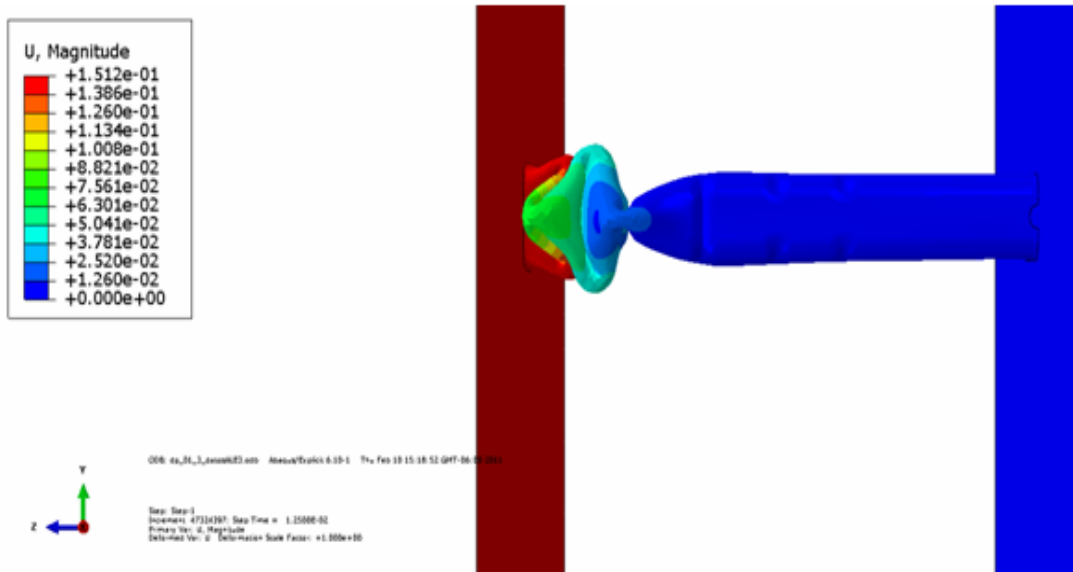


Figura 5.15 Reducción de longitud de 151.2 mm obtenida en la compresión de la pieza de acero DP600.

El acero PM590 al ser sometido al proceso de compresión alcanzó un esfuerzo máximo de 960 MPa y una reducción en su longitud de 156.8 mm, equivalente a una compresión de 27.25% de la longitud original de la pieza tubular. En las figuras 5.15, a la 5.18 se muestra la pieza al finalizar el proceso de compresión.

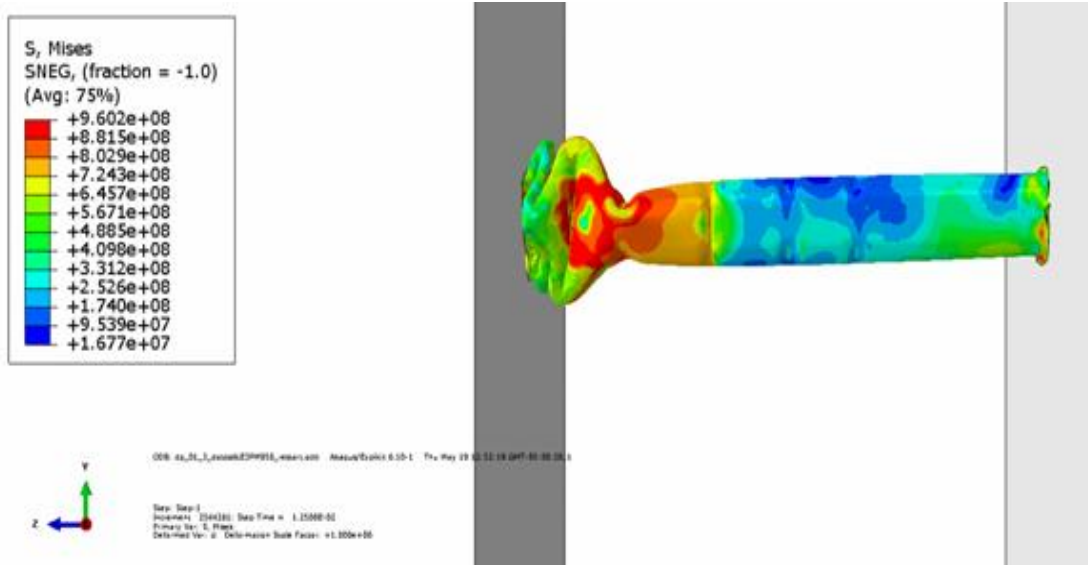


Figura 5.16 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista lateral).

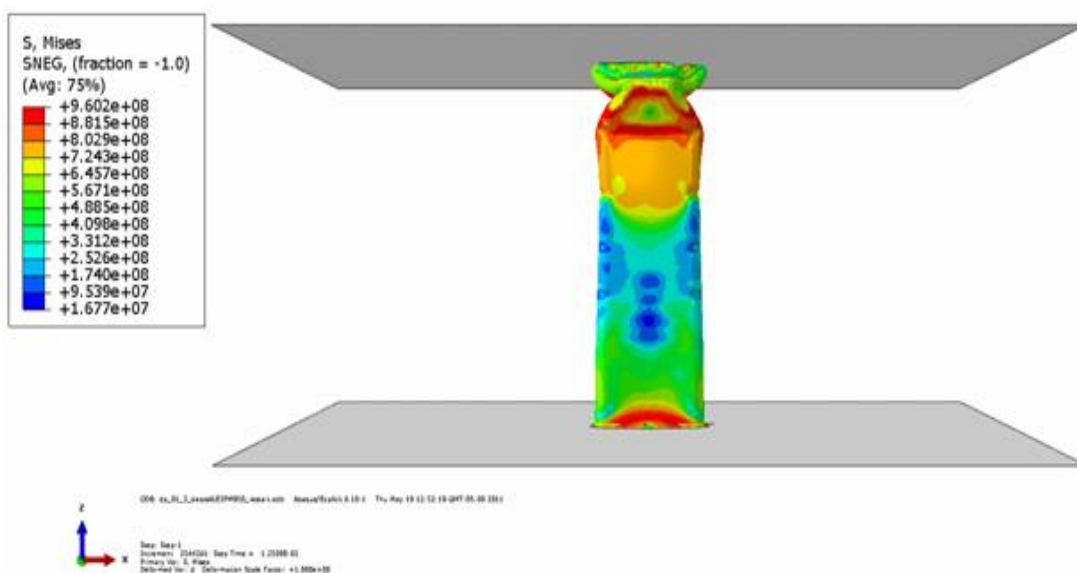


Figura 5.17 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista superior).

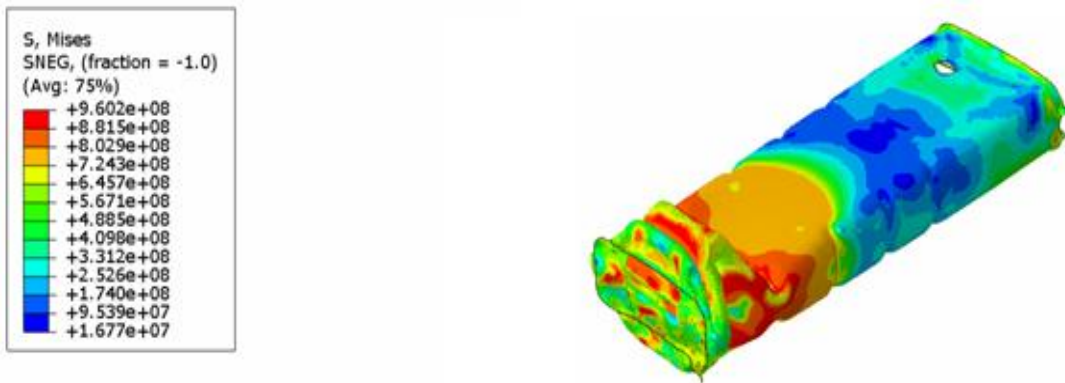


Figura 5.18 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista isométrica).

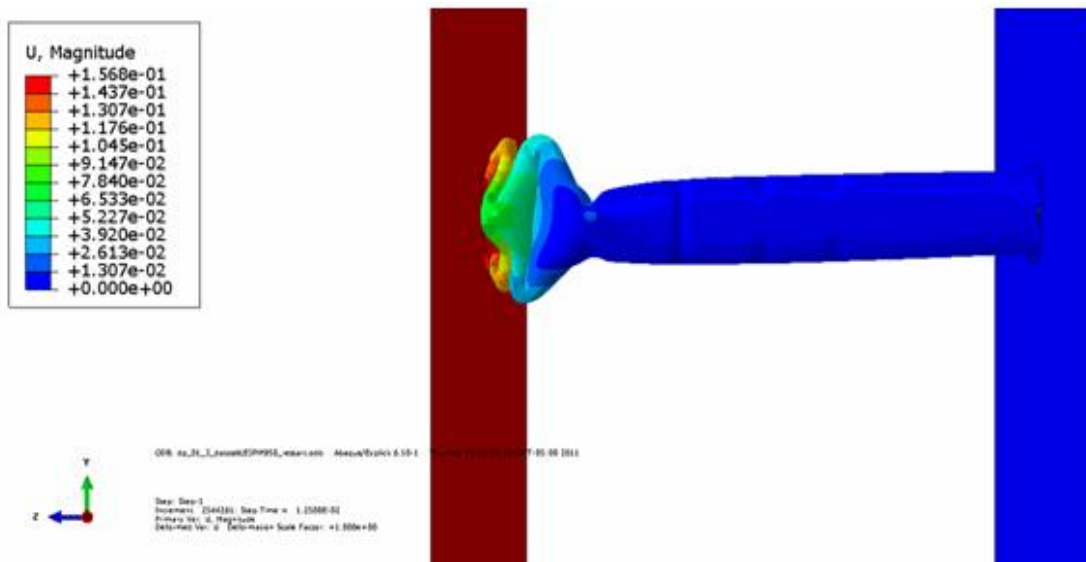


Figura 5.19 Reducción de longitud de 156.8 mm obtenida en la compresión de la pieza de acero PM590.

En la tabla 5.10 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de compresión de los aceros HSLA, DP600 y PM590.

Resultados de la compresión de los aceros HSLA, DP600 y PM590			
	σ_{max}	Reducción de longitud	Reducción de longitud
Acero	(MPa)	(mm)	(%)
HSLA	409	347.7	60.34
DP600	1012	151.2	26.24
PM590	960	156.8	27.25

Tabla 5.10 Resultados de la compresión de los aceros HSLA, DP600 y PM590.

El acero DP600 durante el proceso de simulación fue el que obtuvo la mayor resistencia mecánica ($\sigma_{max} = 1012$ MPa), por lo tanto es el acero que presentó el mejor comportamiento en la pieza tubular al ser sometida a un impacto. Sin embargo el acero DP600 y el PM590 presentaron grado de conformabilidad bajo, debido a que se obtuvieron reducciones en la longitud original de la pieza tubular de alrededor del 26.5%.

Los pasos secuenciales del proceso de compresión de los aceros HSLA grado 35, DP600 y PM590 son establecidos predeterminadamente por el paquete Abaqus, el resumen de estos se encuentra en el Apéndice C.

5.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE REEMPLAZO

El acero DP600 es el que presentó las mejores propiedades mecánicas, el valor más elevado en la relación de deformación plástica y el mejor comportamiento en la simulación de la compresión de la pieza tubular, de los aceros estudiados.

En la tabla 5.11 se muestra una comparación entre las propiedades del acero HSLA y DP600.

Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el DP600								
Acero	Propiedades del ensayo de tensión						Propiedades de simulación	
	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ	%El	R	σ_{max} (MPa)	Reducción de longitud (%)
HSLA	275	413	328	0.35	21	1	409	60
DP600	624	985	827	0.21	25	0.51	1012	26.24

Tabla 5.11 Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el DP600.

El acero DP600 es el material más adecuado para reemplazar al acero HSLA debido a que presenta las mejores propiedades mecánicas (σ_y , σ_{max} , σ_u , ϵ , %El) y muestra un mejor comportamiento en la compresión de la pieza tubular, esto se debe a la composición química, ya que el acero DP600 tiene un mayor contenido de aleantes en comparación con el acero HSLA.

El acero DP600 presentó un esfuerzo a compresión de 2.47 veces mayor que el obtenido en el acero HSLA, lo que permite disminuir el espesor de la pieza tubular ese mismo número de veces, esto reducirá el espesor de la pieza fabricada con acero DP600 a 1.41mm, pero como no es un espesor comercial se reducirá a 1.519mm para igual el esfuerzo que presenta el acero HSLA con un espesor de 3.5mm, lo que brindaría una reducción en peso del 43.4% para la pieza tubular de 5.6Kg, para tener como peso final 3.17Kg la pieza fabricada con acero DP600.

Es de suma importancia conocer otras propiedades de los aceros como la vida a la fatiga, la soldabilidad, resistencia a la corrosión, pandeo, costos, etc. antes de considerar reemplazar un material de una pieza con resistencias más elevadas.

CAPÍTULO 6

DISCUSIONES

En este capítulo se presenta la discusión, de los resultados obtenidos en esta investigación, así como la relación entre las propiedades mecánicas, la manufactura y el desempeño de la pieza automotriz.

Los resultados del análisis químico, en ambos aceros muestran que la mayoría de los elementos aleantes están dentro del rango de la composición nominal, los elementos restantes como Mn, Ni y Mo presentaron una diferencia porcentual muy pequeña. La clasificación de estos aceros es basada en sus propiedades mecánicas y microestructura, no en la composición química. Sin embargo la química y el tratamiento termo-mecánico de estos aceros son las bases para que el material cumpla con las propiedades mecánicas y microestructura solicitadas por la industria automotriz.

El análisis metalográfico y cuantitativo, muestran que ambos aceros tienen un tamaño de grano pequeño. El cual les permite aumentar el límite elástico del acero, lo cual se observó en el acero PM590, el cual posee un tamaño de grano menor y un límite elástico superior al del acero DP600. Un tamaño de grano menor, incrementa la resistencia mecánica, debido a que las dislocaciones en la estructura cristalina tendrán menor movilidad al impedir su movimiento, esto hace al acero en más duro y resistente.

El porcentaje de martensita está relacionado con el contenido de carbono del acero, así como de la temperatura y velocidad de enfriamiento del tratamiento termo-mecánico. La fracción volumétrica de islas de martensita se relaciona conforme aumenta el contenido en carbono y se

reduce la temperatura del tratamiento. Esta propiedad también está influenciada por el contenido de otros elementos de aleación y por las condiciones de enfriamiento utilizadas. El contenido de carbono afecta las temperaturas de inicio y fin de la transformación martensítica. A un contenido mayor de carbono en el acero, menores serán estas temperaturas.

Los resultados de dureza obtenida en los aceros, mostraron una mayor dureza en el acero PM590, lo que se atribuye a que este acero posee un mayor contenido de carbono, lo cual genera en la microestructura un porcentaje mayor de fase martensítica dentro de la matriz ferrítica, la cual incrementa la resistencia y la dureza del material y esto se debe a que su red cristalina no sea cúbica sino tetragonal. La tetragonalidad de la martensita incrementa con el contenido de carbono. La martensita se forma por la deformación de la red cristalina de la austenita sin ninguna difusión de átomos, debido a que la austenita se calienta y se enfría rápidamente no hay tiempo para que haya difusión.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos de tensión, ambos aceros no mostraron cambios significativos en sus propiedades mecánicas durante los ensayos a diferentes velocidades de cabezal, ni a la dirección de laminación. Por lo tanto ambos aceros muestran un comportamiento isotrópico, es decir pueden ser conformados en cualquier dirección y a diferente velocidad sin variar sus propiedades mecánicas.

Uno de los principales problemas al implementar los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés) es el fenómeno de recuperación elástica (conocido en inglés como springback) el cual es mayor en estos materiales debido a su alta resistencia. La deformación elástica causa el springback, es por esto que los aceros con grandes variaciones en el esfuerzo de cedencia causarían variaciones en la recuperación elástica. Para evitar este problema, el esfuerzo de cedencia del acero tiene que ser estrictamente controlado. La recuperación elástica es mayor en el material que presente un área mayor deformada y endurecida por deformación.

Debido a esto se predice que el acero DP600 presentará un efecto de recuperación elástica mayor al acero PM590, ya que este presenta una mayor área deformada y mayor endurecimiento por deformación. Entre mayor es el endurecimiento por deformación, su resistencia se incrementa al ser deformado plásticamente, es decir el endurecimiento por deformación vuelve más duro y resistente el acero, pero disminuye su ductilidad.

Para evaluar la formabilidad del acero es necesario conocer el exponente de endurecimiento por deformación y la relación de deformación plástica. El endurecimiento por deformación (valor-n) se relaciona con la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región plástica uniforme, a partir del punto de cedencia al esfuerzo último de tensión, también se relaciona con la elongación uniforme del acero y la relación de la resistencia a la tensión y la cedencia. Al aumentar esta relación aumenta también el valor n y la capacidad de estiramiento profundo del acero. Durante este proyecto el acero DP600 presentó una relación entre la resistencia última y la cedencia mayor que el acero PM590, lo cual indica que este sufre un mayor endurecimiento por deformación y mayor elongación. Para la máxima elasticidad, se requiere el uso de acero con menor resistencia a la cedencia permitida por la especificación y que tenga mayor rango entre la resistencia a la cedencia y la tensión para poder mejorar su formabilidad, disminuir roturas durante el conformado y desgaste de herramientas de formado. El acero DP600 presentó valores más altos de elasticidad, por ello este acero es recomendable en piezas donde su manufactura requiera una mayor ductilidad en el material.

Los aceros doble fase son frecuentemente utilizados en partes donde la resistencia a la cedencia pueda ser incrementada por endurecimiento por deformación durante el formado, y donde la alta resistencia sea demandada. Esto se obtiene debido a que la microestructura de estos aceros comprende dos fases ferrita y martensita. La ferrita proporciona formabilidad, debido a que cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC por sus siglas

en ingles) con capacidad muy limitada para disolver el carbono y la martensita brinda alta resistencia.

La relación de deformación plástica (r), es un parámetro que indica la capacidad de las láminas metálicas a resistir el adelgazamiento o engrosamiento al ser sometidas a fuerzas de tensión o compresión en el plano de la lámina. El valor r es una medida de la anisotropía plástica y está relacionada con la orientación cristalográfica preferencial en un metal policristalino. A mayor relación de deformación plástica del material, mayor será la conformabilidad del material en un proceso de embutido o estampado profundo. El DP600 presentó la conformabilidad más elevada de los aceros estudiados, este acero tiene una alta resistencia mecánica y una mayor deformación del material, lo que produce una mejor manufacturabilidad de las piezas evitando roturas durante el conformado.

Los resultados obtenidos en la reducción en longitud de la pieza tubular mediante simulación para el acero PM590 (27.25%) son ligeramente mayores que los obtenidos para el acero DP600 (26.24%). Sin embargo, el acero DP600 obtuvo la mayor resistencia mecánica, y debido a que la diferencia de reducción en longitud es muy pequeña, el acero DP600 es el que presentó mejores propiedades mecánicas. En un estudio realizado por Kremer [39] a una pieza tubular de acero AISI 304 de 305mm de largo, 2.97 mm de espesor, se presentó una alta deformación del material durante los impactos en automóviles, la deformación alcanzada fue de 178mm, es decir 58% de su longitud inicial. La diferencia entre los resultados obtenidos en estos aceros se debe a la composición química, y a las diferentes dimensiones de las piezas tubulares. Por lo tanto se concluye que el diseño de la pieza juega un papel importante ya que afecta la energía que la pieza pueda absorber, es importante considerar este aspecto en el desempeño de la pieza.

Entre mejores propiedades mecánicas posea un material, mayor será su aprovechamiento en aplicaciones estructurales, sin embargo es necesaria

una mayor cantidad de energía para su producción, también la cantidad de energía requerida para su manufactura es menor, lo que representa un mayor grado de conformabilidad de los aceros AHSS y vuelve más rápido su procesamiento.

La cantidad emitida de CO₂ está directamente ligada a la cantidad de energía que requieren los procesos de producción y manufactura, es conveniente por cuestiones ambientales, considerar el reciclaje de los materiales al final de su ciclo de vida, ya que de esta manera se disminuirá un porcentaje de las emisiones de gases invernadero al recomenzar su ciclo.

Algunos factores importantes que influyen en el costo total de un producto manufacturado en acero son: propiedades mecánicas, que permita reducir peso en componentes, mayor facilidad de producción, vida más larga, fabricación, distribución, disponibilidad, almacenamiento, entre otros. La resistencia del material tiene una alta relación con su costo.

Es importante caracterizar otras propiedades en los materiales antes de considerarlos como un reemplazo. Los aceros de alta resistencia ofrecen una excelente opción, sin embargo es necesario conocer sus propiedades incluyendo la absorción de energía, fatiga, corrosión, tenacidad, formabilidad, soldabilidad, durabilidad, resistencia a la abrasión, así como el precio y disponibilidad del material, ya que estos factores influyen directa e indirectamente el desempeño del componente automotriz.

La rigidez de un elemento estructural es controlada por el módulo de elasticidad y la geometría del elemento. El módulo de elasticidad es constante para el acero, el cambio de grado de acero no influirá en la rigidez del vehículo, por lo cual el diseñador debe modificar la geometría de los componentes y la estructura para poder adelgazar un componente, debido a que la rigidez disminuye si el espesor del material es reducido. La formabilidad mejorada de los AHSS ofrece una mayor flexibilidad de diseño,

lo que permitirá mejorar la rigidez de componentes sin aumentar la masa o sacrificar la resistencia.

Para complementar la caracterización realizada en esta tesis, como parte del proceso de remplazo de materiales en componentes automotrices, es necesario realizar un estudio para predecir la vida a la fatiga del componente estructural, en el cual se utilizan relaciones entre diversos factores que incluyen la geometría, el espesor, las cargas aplicadas y el límite de resistencia del material. Las excelentes propiedades mecánicas inferidas por el tratamiento termo-mecánico y procesamiento de componentes manufacturados con AHSS, resulta en un mejor desempeño a la fatiga. Por lo cual al considerar un remplazo de materiales en partes estructurales, es vital realizar análisis de la vida a la fatiga del material ya que esto permitirá predecir la iniciación de microgrietas (aparecen en áreas donde se produce concentración de esfuerzos), y predecir su propagación hasta el fallo final por fractura.

El acero es el principal material utilizado en las estructuras de vehículos automotores es por esto que sus propiedades influyen en gran medida en el rendimiento de las partes estructurales del vehículo, y su capacidad de absorción de energía. Los AHSS son aceros más costosos que los utilizados actualmente, sin embargo las simplificaciones en los procesos de producción asociadas a su uso pueden compensar el costo más elevado del material. Las excelentes propiedades mecánicas y absorción de energía permiten reducir peso e incrementar la seguridad en partes estratégicas de un vehículo, y por consiguiente reducir la cantidad de material utilizado para fabricar la pieza automotriz, es por esto que pueden generar un costo total menor.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un desarrollo experimental válido para evaluar las propiedades mecánicas y de conformabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia DP-600 y PM-590. Las conclusiones de esta investigación son:

- Se determinó al acero DP600, como el acero que presenta las propiedades mecánicas más elevadas en sentido longitudinal a la dirección de laminación, debido a que presenta una mayor resistencia y mayor grado de deformación aportando mejores propiedades en cuanto a la relación esfuerzo-deformación. Esto se determinó mediante el análisis de las curvas esfuerzo vs. deformación verdadera.
- El acero DP600, posee un mayor coeficiente de endurecimiento por deformación (n), en comparación con el acero PM590, propiedad que le confiere mejores cualidades para usos donde se requiera alta absorción al impacto. Se obtuvieron valores de 0.22 a 0.24 y 0.14 a 0.17 respectivamente, lo cual se determinó mediante el análisis de las curvas esfuerzo deformación verdadera y de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tensión.
- El acero DP600, posee mayor valor de “ r ”, en comparación con el acero PM590, lo cual significa que tiene mejores propiedades de conformabilidad. Se presentaron valores en un rango entre 0.46 a 0.51 para el acero DP600 y de 0.32 a 0.38 para el acero PM590, lo cual se obtuvo a través de los cálculos y análisis de la relación de deformación plástica.

- Los aceros DP600 Y PM590 no mostraron cambios significativos en sus propiedades mecánicas durante los ensayos de tensión realizados a diferentes velocidades de cabezal de 10,100 y 1000 mm/min.
- Los aceros DP600 Y PM590 no mostraron cambios en sus propiedades mecánicas durante los ensayos de tensión realizados a probetas de ángulos 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación.
- El acero DP600 presentó las mejores propiedades mecánicas, el grado más alto de conformabilidad y el mejor comportamiento en la pieza tubular al ser sometido a un impacto. Por lo tanto es el material más adecuado para remplazar al acero HSLA. El acero DP600 presentó un esfuerzo a compresión de 2.47 veces mayor que el obtenido en el acero HSLA, lo que permite disminuir el espesor de la pieza tubular fabricada con acero DP600 lo que permitiría reducir el espesor de la pieza tubular fabricada con acero DP600 a 1.519mm para igualar el esfuerzo que presenta el acero HSLA con un espesor de 3.5mm, lo que brindaría una reducción en peso del 43.4% para la pieza tubular de 5.6Kg, para tener como peso final 3.17Kg de la pieza fabricada con acero DP600.
- Se pueden obtener reducciones en el peso de las piezas estructurales utilizando aceros avanzados de alta resistencia debido a su alto esfuerzo máximo el cual permite remplazar materiales de menor resistencia, utilizando un espesor menor que con el que originalmente cuenta el material, igualándose así los esfuerzos entre los materiales. Esto lleva a una reducción en el peso de las partes estructurales del chasis de un automóvil, que a su vez genera reducciones en el consumo de combustibles fósiles, y por consiguiente menor emisión de CO₂ por Km recorrido, lo cual representa un impacto benéfico para el medio ambiente.

CAPÍTULO 8

RECOMENDACIONES

En el presente trabajo de investigación se ha caracterizado las propiedades mecánicas y de conformado de los aceros DP600 y PM590 para usarlas en simulación, con el fin de poder solucionar los problemas que plantean en conformado este tipo de aceros, por eso las futuras líneas de investigación se plantean en esta dirección. Se recomienda como trabajo a futuro las siguientes actividades:

- Para profundizar este trabajo, el siguiente paso sería ampliar más en operaciones de conformado, realizando ensayos de copa Olsen, para obtención de diagramas de límite de formado (FLD, por sus siglas en ingles), y el estudio de éstas. Y así complementar el estudio de conformabilidad de los aceros avanzados.
- Realizar un estudio del fenómeno de recuperación elástica en operaciones de conformado, debido a la creciente necesidad de realizar predicciones exactas de éste fenómeno ya que se le considera la fuente real de la mayoría de los problemas de conformado.
- Realizar ensayos de tensión a diferentes temperaturas a las velocidades de cabezal y direcciones de la probeta ya establecidos con la finalidad de determinar la dependencia del comportamiento con la temperatura.
- Realizar pruebas de impacto con la finalidad de determinar la tenacidad de los aceros DP600 y PM590, mediante la máquina de ensayos Charpy.

- Finalmente profundizar en el estudio del comportamiento a la fatiga mecánica de aceros DP600 y PM590 a diferentes condiciones del proceso de estampado, y obtener las curvas deformación contra vida a la fatiga, para establecer una metodología para la estimación de la vida útil de estos aceros.

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFICAS

- [1] Callister W., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Rervete S.A., 1995, pp. 2.
- [2] Aceros Avanzados de Alta Resistencia AHSS, OTEA, Mayo 2008.
- [3] Aceros de Ultra Alta Resistencia: Mayor Resistencia – Menor Peso, SAAB, 2006.
- [4] García D., Aceros de Ultra Alta Resistencia: Mayor Resistencia-Menor Peso, 2008.
- [5] Sala J., Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): DP-800 y TRIP-800, 2008.
- [6] Haduch Z., Et al., Aceros de Construcción de Propiedades Especiales, 2007.
- [7] Baron J., Et al., Formado de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS), 2006.
- [8] Tumuluru M., Resistance Spot welding of Coated High-Strength Dual Phase Steels, 2006.
- [9] Anderson D., Application and Reparability of AHSS, 2008.
- [10] Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, International Iron and Steel Institute, 2006.

- [11] Federici C., Et al., The use of Advanced High Strength Steel Sheets in the automotive industry, 2005.
- [12] García D., Tipos de Acero en las carrocerías y su reparabilidad, 2009.
- [13] Yan B., Et. al., A New Dual Phase Steel for Automotive Body Panels, 2003.
- [14] Tetsuya M., Et al., Ultra High-Strength Steel Sheets for Bodies, Reinforcement Parts, and Seat Frame Parts of Automobile-Ultra High-Strength Sheets Leading to Great Improvement in Crashworthiness, 2004.
- [15] Shaw J., Et al., Achieving An Affordable Low Emission Steel Vehicle; An Economic Assessment of the ULSAB-AVC Program Design, 2002.
- [16] Krupitzer R., Et al., Subiendo la barra, 2006.
- [17] Pastre L., Aceros Avanzados de Alta Resistencia para Remolques, 2007.
- [18] Shaw J., Et al., New High Strength Steels Help Automakers Reach Future Goals for Safety, Affordability, Fuel Efficiency and Environmental Responsibility, 2001.
- [19] Coleman N., Et al., The Role of Steel in Reducing Energy Use and Life Cycle Greenhouse Gas Emissions, 2009.
- [20] Shaw J., Et al., ULSAB-Advanced Vehicle Concepts-Materials, 2002.
- [21] Hongtu S., Et. al., Application of Hot Forming High Strength Steel Parts on Car Body in Side Impact, 2010.
- [22] Wagoner R., Advanced High Strength Steel (AHSS) Workshop, 2006.

- [23] Maffei B., Et al., Dual Phase Steel Rebars for High Ductile R.C. Structures, Part 1: Microstructural and Mechanical Characterization of Steel Rebars, 2007.
- [24] Glennan T., Strategies for Managing Vehicle Mass Throughout the development Process and Vehicle Lifecycle, 2007.
- [25] Advanced High-Strength Steel Applications Guidelines, Auto/Steel Partnership, 2008.
- [26] López V., Tesis de Maestría, COMIMSA, Soldabilidad de Aceros Avanzados de Alta Resistencia tipos martensíticos mediante soldadura de puntos por resistencia (RSW) en componentes automotrices, diciembre 2008.
- [27] Pérez G., Estudio de la Soldabilidad de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS): Martensíticos, Doble Fase (DP) y de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP), 2008.
- [28] Askenland D., Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Internacional Thomson Editores, 1998, pp. 130-160.
- [29] ASM Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures, 2004, pp. 1384-1485.
- [30] ASM Metals Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000, pp. 428-468.
- [31] Dieter G., Mechanical Metallurgy SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988, pp. 331-332.
- [32] Gameiro C., Dynamic Axial Crushing of Short to Long Circular Aluminium Tubes with Agglomerate Cork Filler, 2007.

- [33] Zambrano P., Tesis Doctoral FIME-UANL, Utilización de la Técnica de Microscopía de Imágenes de Orientación para Relacionar la Microtextura de Aceros Laminados en Caliente con la Anisotropía, Octubre 2000.
- [34] Escribano M., El Análisis por Elementos Finitos: una metodología muy reciente en economía, 2005.
- [35] Uzcátegui M., Abaqus Programa de Elementos Finitos, 2006.
- [36] ASTM, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio for Sheet Metal, E-517, 2007.
- [37] ASTM, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, E-112, 2004.
- [38] ASTM, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents of Metallic Sheet Materials, 2007.
- [39] Kremer K., Metal Foams for Improved Crash Energy Absorption in Passenger Equipment, 2004.
- [40] Koganti R., Et al., Bending Performance of Advanced High Strength Steel Tubes, 2009.
- [41] Laxman S., Et al., Achieving Light-Weight Design of Automotive Bodies with Advanced High Strength Steels via Structural Optimization, 2009.
- [42] Koganti R., Et al., Bending Process Optimization of Dual Phase 780 (DP780) Tubes for Body Structural and Chassis Applications, 2010.
- [43] Chen G., Et al., Axial Crash Testing and Finite Element Modeling of A 12-Sided Steel Component, 2010.
- [44] Zhu H., Et al., Advanced Material Characterizations and Constitutive Modeling for AHSS Springback Predictions, 2010.

- [45] Hall J., Et al., Investigation of Stamping Tooling Durability for Dual Phase Steels, 2011.
- [46] Chen G., Et al., Fracture Modeling of AHSS in Component Crush Tests, 2011.
- [47] Zhu H., Et al., A Mixed-Mode Fracture Criterion for AHSS Cracking Prediction at Large Strain, 2011.
- [48] Codd D., Automotive Mass Reduction with Martensitic Stainless Steel, 2011.
- [49] Shaw J., Et al., Achieving a Lightweight and Steel-Intensive Body Structure for Alternative Powertrains, 2011.

LISTA DE FIGURAS

Figura - Nombre	Página
Figura 1.1 Evolución histórica del desarrollo de aceros de alta resistencia [5].	3
Figura 1.2 Gráfica de la evolución de los AHSS usados en la carrocería de los autos [8].	4
Figura 1.3 Contenido en peso por vehículo de aceros AHSS [9].	4
Figura 1.4 Tipos de aceros seleccionados para partes individuales de un automóvil USLAB-AVC International Iron and Steel Institute 2002 [9].	5
Figura 3.1 Clasificación de aceros AHSS en función de su conformabilidad [10].	15
Figura 3.2 Esquema de obtención de aceros DP por enfriamiento controlado [22].	18
Figura 3.3 Esquema de la microestructura de los aceros DP [10].	20
Figura 3.4 Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero DP [23].	20
Figura 3.5 Metalografía de un acero DP, mostrando una microestructura consistente de ferrita (zonas oscuras, F) y un 11% de martensita (zonas claras, M) [22].	21
Figura 3.6 El esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros doble fase y su porcentaje de elongación [2].	22
Figura 3.7 Comparación de la curva σ - ϵ de un DP con un HSLA con el límite elástico similar (350Mpa). El acero DP presenta un trabajo de endurecimiento inicial más elevado, una tensión máxima más elevada y un radio YS/TS más pequeño que el HSLA [10].	23
Figura 3.8 Esquema que muestra la obtención de los aceros TRIP [22].	24
Figura 3.9 Microestructura típica de un acero TRIP [10].	25
Figura 3.10 Esquema muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros TRIP y su	27

porcentaje de elongación [2].	
Figura 3.11 Comparación de TRIP, DP y HSLA mediante curva σ - ϵ ingenieril [10].	28
Figura 3.12 Esquema de la microestructura de los aceros martensíticos [22].	30
Figura 3.13 Esquema que muestra los rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros martensíticos y su porcentaje de elongación [2].	31
Figura 3.14 Rangos de esfuerzo a la tensión en MPa en los cuales se encuentran los aceros de fase compleja y su porcentaje de elongación [2].	32
Figura 3.15 Rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros de FB [2].	33
Figura 3.16 Esquema de los rangos de esfuerzo a la tensión y cedencia en aceros TWIP [2].	34
Figura 4.1 Posición en las que fueron cortadas las probetas para ensayos de tensión.	39
Figura 4.2 Máquina de corte con agua y arena.	40
Figura 4.3 Distribución de las probetas en las diferentes secciones de lámina.	40
Figura 4.4 Espectrómetro de emisión de óptica, marca BELEC y modelo VarioLab.	41
Figura 4.5 Sección transversal de la muestra, respecto a la dirección de laminación.	42
Figura 4.6 Pulidora Struers modelo LaboPol-1.	43
Figura 4.7 Microscopio óptico Nikon modelo FX-35WA.	45
Figura 4.8 Durómetro Wilson modelo series 500.	47
Figura 4.9 Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.	49
Figura 4.10 Dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos de tensión.	50
Figura 4.11 Máquina universal de pruebas marca Instron modelo	51

8502.	
Figura 4.12 Diseño de experimentos para ensayos de tensión.	52
Figura 4.13 Ejemplo simulación de impacto de un vehículo, imagen superior simulación, imagen inferior prueba real, se observa el parecido del resultado final de la deformación entre ambas imágenes [5].	53
Figura 4.14 Diseño de pieza tubular.	55
Figura 4.15 Pieza tubular entre paredes sólidas.	56
Figura 4.16 Ubicación en el chasis de la pieza tubular.	57
Figura 5.1 Fotomicrografía del acero DP600 a 400X, revela un tamaño de grano promedio ASTM de 9.5 (13.3 μ m), las zonas oscuras muestran la fase martensítica dentro de la matriz ferrítica.	62
Figura 5.2 Fotomicrografía del acero PM590 a 400X, revela un tamaño de grano promedio ASTM de 12 (6 μ m), las zonas oscuras muestran el alto contenido de martensita dentro de la matriz ferrítica.	63
Figura 5.3 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 10mm/min.	66
Figura 5.4 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 100mm/min.	68
Figura 5.5 Curva Esfuerzo-Deformación verdadera de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 1000mm/min.	69
Figura 5.6 Relación de deformación plástica promedio DP600 y PM590 a velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.	75
Figura 5.7 Relación de deformación plástica DP600 a velocidad de cabezal de 10 mm/min a las diferentes direcciones de laminación.	76
Figura 5.8 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista lateral).	77
Figura 5.9 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista superior).	77
Figura 5.10 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347.7 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista isométrica).	78

Figura 5.11 Reducción en longitud de 347.7 mm (409 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de HSLA.	78
Figura 5.12 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista lateral).	79
Figura 5.13 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista superior).	80
Figura 5.14 Esfuerzo máximo de 1012 MPa obtenido a 151.2 mm de compresión de la pieza de acero DP600 (vista isométrica).	80
Figura 5.15 Reducción de longitud de 151.2 mm obtenida en la compresión de la pieza de acero DP600.	81
Figura 5.16 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista lateral).	82
Figura 5.17 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista superior).	82
Figura 5.18 Esfuerzo máximo de 960 MPa obtenido a 156.8 mm de compresión de la pieza de acero PM590 (vista isométrica).	83
Figura 5.19 Reducción de longitud de 156.8 mm obtenida en la compresión de la pieza de acero PM590.	83
Figura C1 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 1/17 (403 MPa a 20.41 mm).	110
Figura C2 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 4/17 (409 MPa a 81.64 mm).	110
Figura C3 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 8/17 (408 MPa a 163.29 mm).	111
Figura C4 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 12/17 (407 MPa a 244.92 mm).	111
Figura C5 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 17/17 (409 MPa a 347.7 mm).	112
Figura C6 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 1/20 (1005 MPa a 10.15 mm).	112
Figura C7 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 5/20 (1013 MPa a 39.07 mm).	113

Figura C8 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 10/20 (1013 MPa a 75.93 mm).	113
Figura C9 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 15/20 (1013 MPa a 113.7 mm).	114
Figura C10 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 20/20 (1012 MPa a 151.2 mm).	114
Figura C11 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 1/20 (952 MPa a 9.57 mm).	115
Figura C12 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 5/20 (957 MPa a 39.1 mm).	115
Figura C13 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 10/20 (960 MPa a 79.05 mm).	116
Figura C14 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 15/20 (960 MPa a 115.9 mm).	116
Figura C15 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 20/20 (960 MPa a 156.8 mm).	117
Figura C16 Absorción de energía de pieza tubular de HSLA	117
Figura C17 Absorción de energía de pieza tubular de DP600	118
Figura C18 Absorción de energía de pieza tubular de PM590	118

LISTA DE TABLAS

Figura - Nombre	Página
Tabla 3.1 Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC.YS y UTS son valores mínimos. Tot. EL (elongación total) es un valor típico para un gran rango de espesores y longitudes calibradas [10].	16
Tabla 3.2 Composición química de aceros doble fase 600 [26].	21
Tabla 3.3 Composición química de aceros TRIP 800 [26].	26
Tabla 3.4 Composición química de los aceros martensíticos [26].	31
Tabla 4.1 Composición química nominal de acero doble fase 600.	38
Tabla 4.2 Composición química nominal de acero martensítico.	38
Tabla 4.3 Ataques químicos por inmersión para aceros DP600 y PM590 [27].	44
Tabla 4.4 Ensayo de dureza Rockwell.	46
Tabla 4.5 Ensayo de dureza Vickers.	48
Tabla 5.1 Composición química experimental acero DP600.	58
Tabla 5.2 Composición química experimental acero PM590.	60
Tabla 5.3 Resultados dureza Rockwell B de aceros DP600 y PM590.	64
Tabla 5.4 Resultados dureza Vickers de aceros DP600 y PM590.	64
Tabla 5.5 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 10mm/min.	67
Tabla 5.6 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 100mm/min.	68
Tabla 5.7 Resumen de las propiedades mecánicas de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal de 1000mm/min.	70
Tabla 5.8 Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a ángulo constante.	70

Tabla 5.9 Diferencia porcentual del esfuerzo máximo y del porcentaje de elongación de los aceros DP600 y PM590 a velocidad de cabezal constante.	72
Tabla 5.10 Resultados de la compresión de los aceros HSLA, DP600 y PM590.	84
Tabla 5.11 Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el DP600.	85

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación - Nombre	Página
Ecuación 1 Relación de deformación plástica	74
Ecuación 2 Relación de deformación de ancho inicial y final	74
Ecuación 3 Relación de deformación de espesor inicial y final	74
Ecuación 4 Relación de deformación plástica promedio	74
Esfuerzo 5 Deformación ingenieril	109
Ecuación 6 Esfuerzo ingenieril	109
Ecuación 7 Deformación ingenieril prima	109
Ecuación 8 Ecuación para corregir el corrimiento en la probeta	109
Ecuación 9 Esfuerzo real	109
Ecuación 10 Deformación real	109
Ecuación 11 Ecuación de Hollomon	109

APÉNDICE A

Presenta las ecuaciones utilizadas para determinar las curvas esfuerzo deformación real correspondiente a los ensayos de tensión [29].

Deformación ingenieril:
$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

Esfuerzo ingenieril:
$$S = \frac{P}{A_0} \quad (\text{Ec. 6})$$

Deformación ingenieril prima:
$$e' = e - e_0 \quad (\text{Ec. 7})$$

Ecuación para corregir el corrimiento en la probeta:
$$e_0 = e_1 - \left[\frac{S_1(e_2 - e_1)}{S_2 - S_1} \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

Esfuerzo real:
$$\varepsilon = \ln(e') + 1 \quad (\text{Ec. 9})$$

Deformación real:
$$\sigma = S(e') + 1 \quad (\text{Ec. 10})$$

Ecuación de Hollomon:
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (\text{Ec. 11})$$

APÉNDICE B

Resumen de la secuencia de la simulación de compresión de la pieza tubular para los aceros HSLA grado 35, DP600 y PM590 y gráficas de absorción de energía de los aceros estudiados en esta investigación.

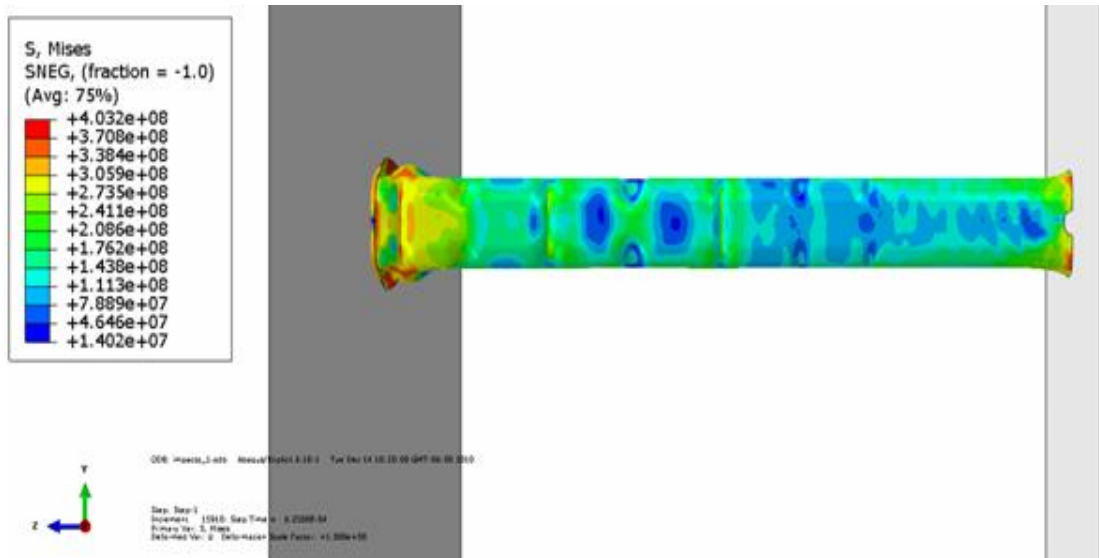


Figura C1 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 1/17 (403 MPa a 20.41 mm).

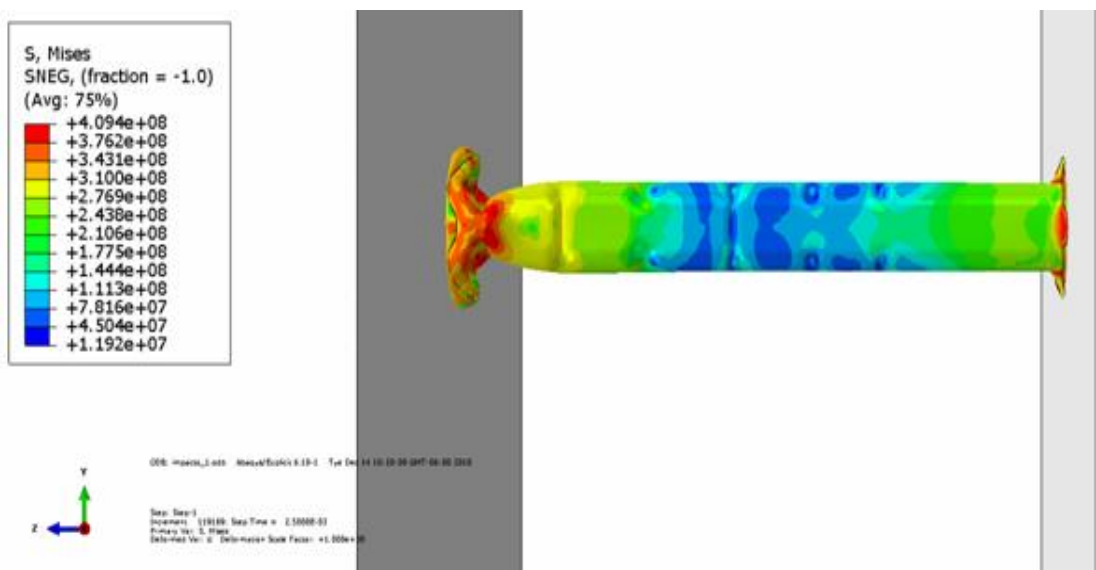


Figura C2 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 4/17 (409 MPa a 81.64 mm).

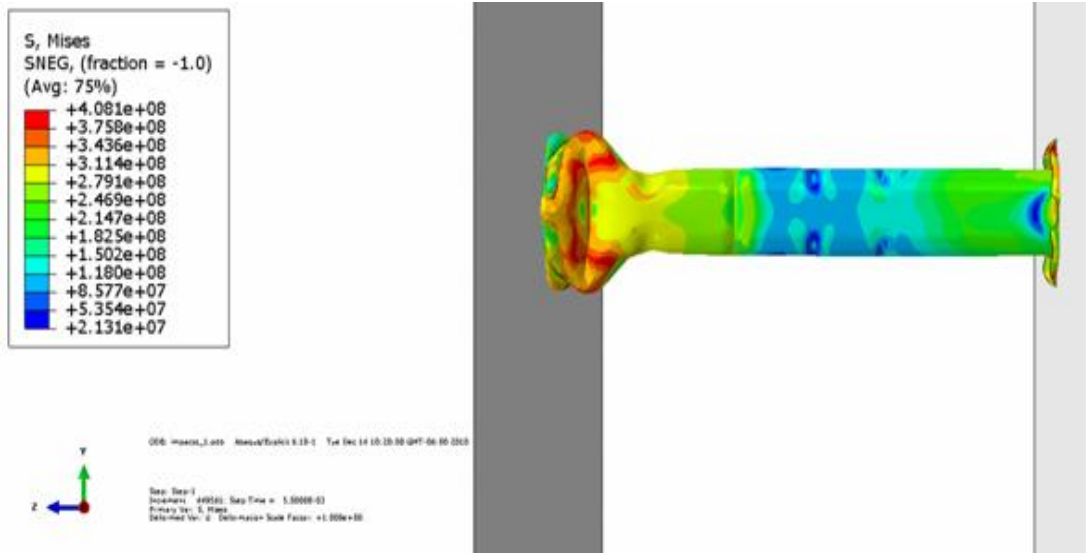


Figura C3 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 8/17 (408 MPa a 163.29 mm).

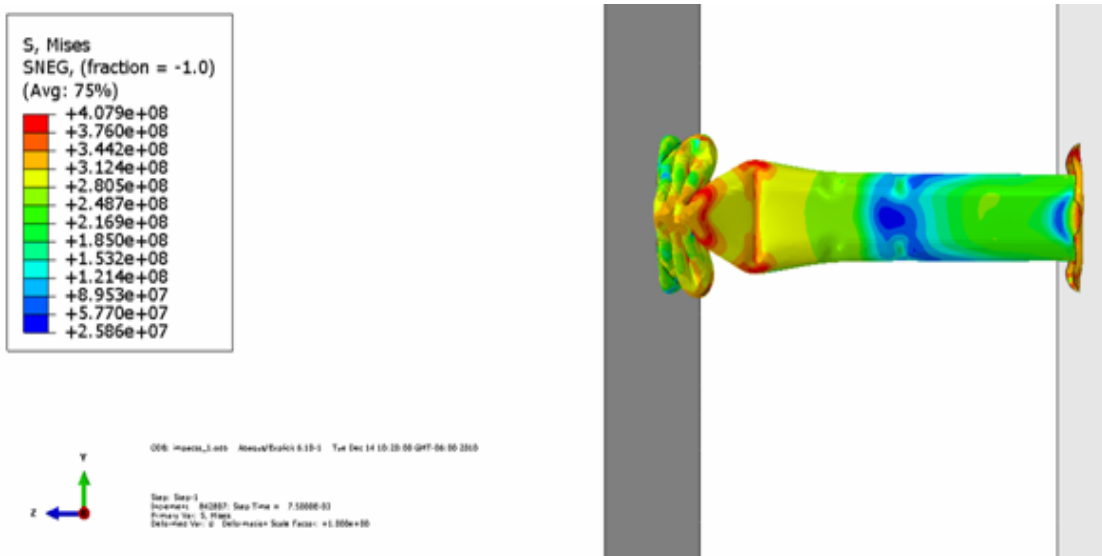


Figura C4 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 12/17 (407 MPa a 244.92 mm).

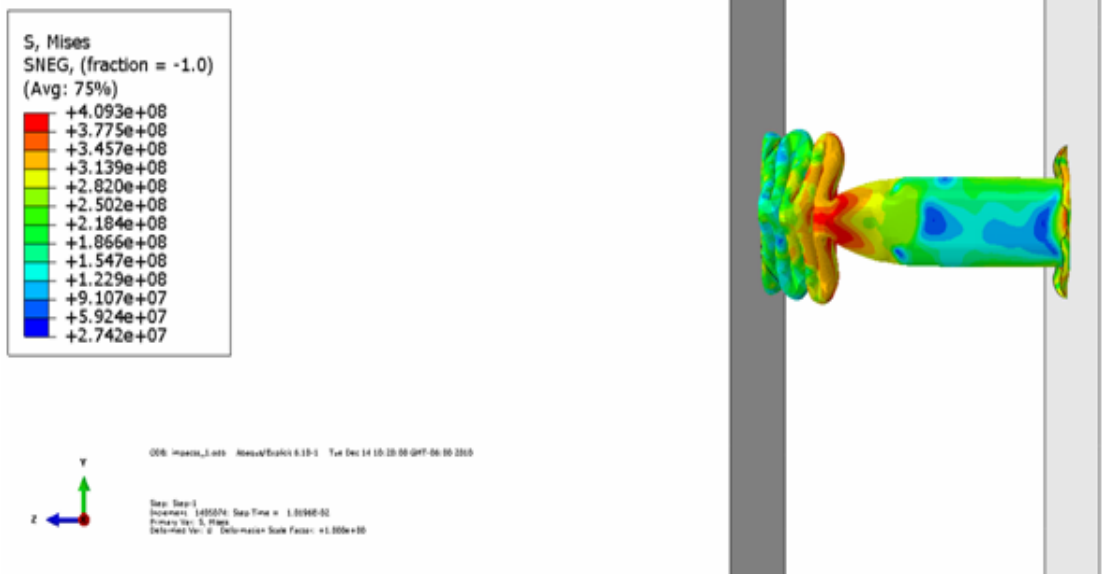


Figura C5 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 17/17 (409 MPa a 347.7 mm).

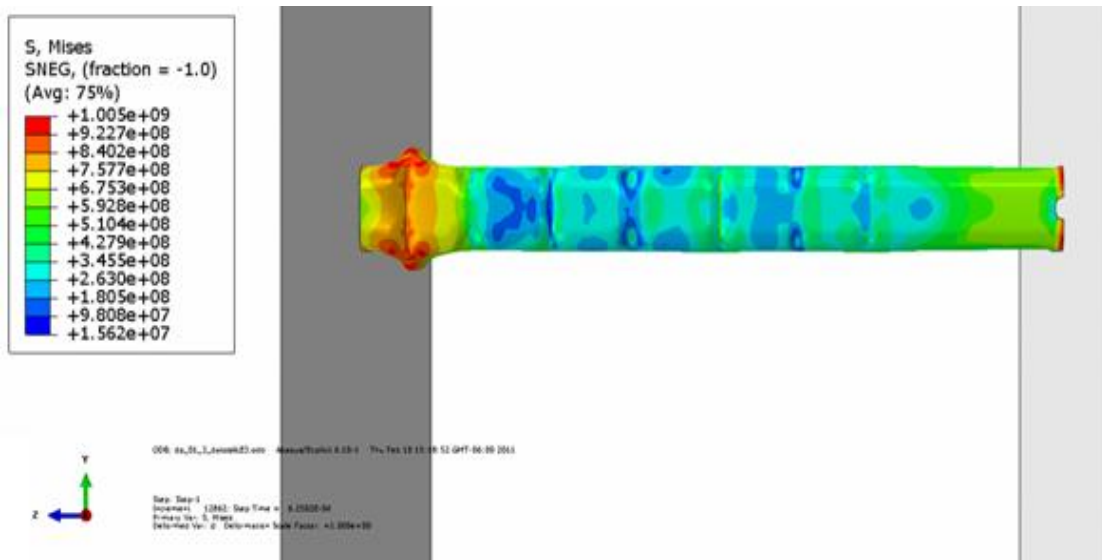


Figura C6 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 1/20 (1005 MPa a 10.15 mm).

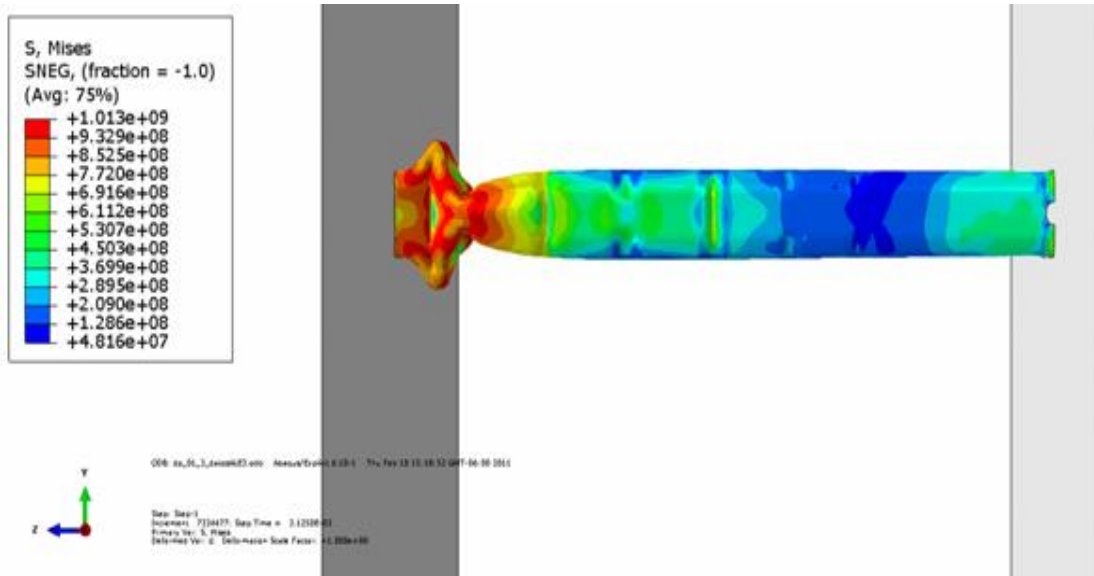


Figura C7 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 5/20 (1013 MPa a 39.07 mm).

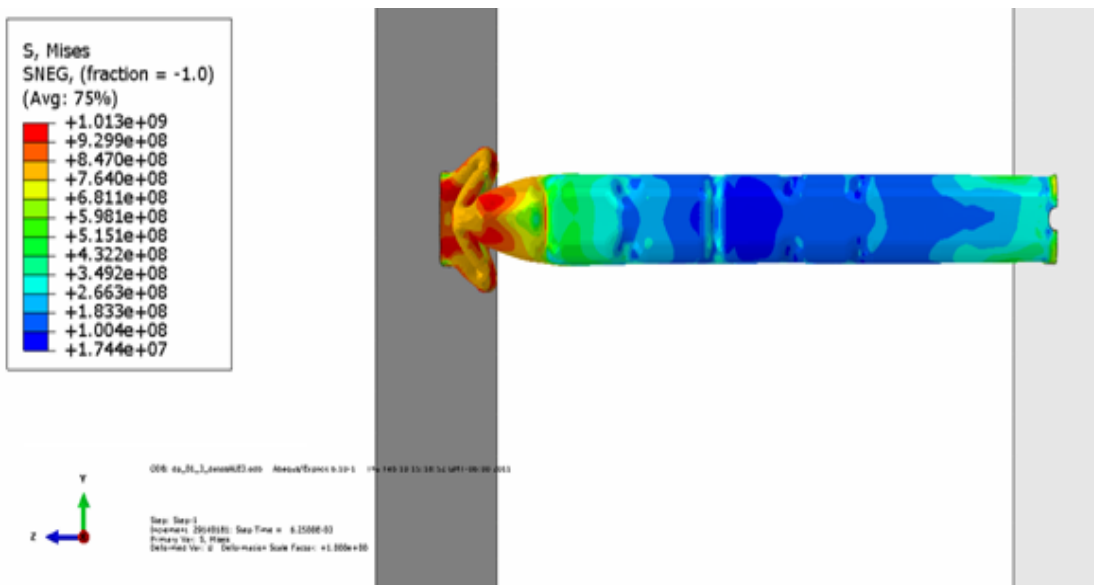


Figura C8 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 10/20 (1013 MPa a 75.93 mm).

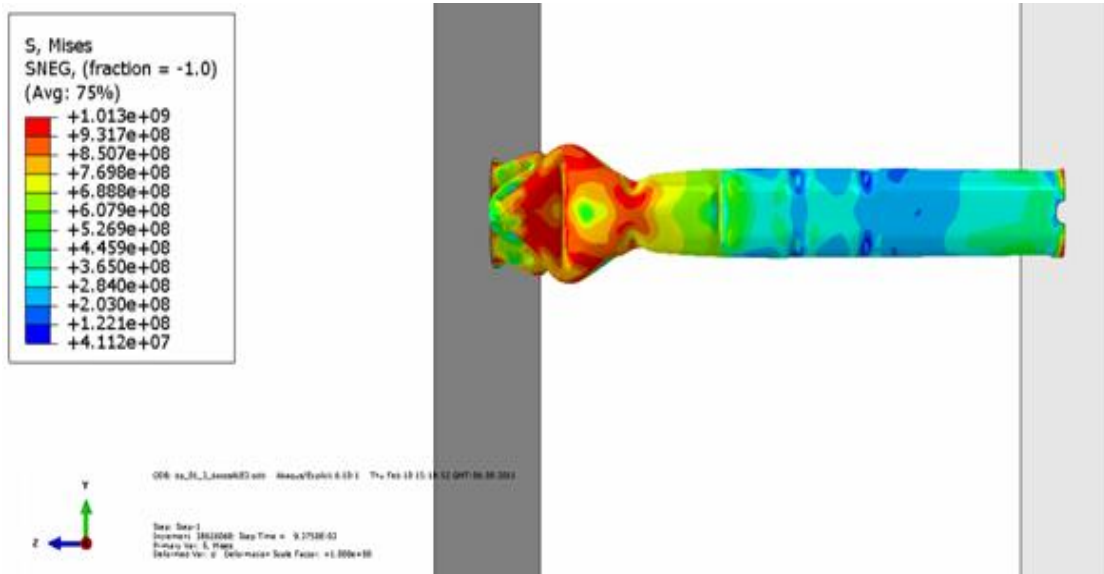


Figura C9 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 15/20 (1013 MPa a 113.7 mm).

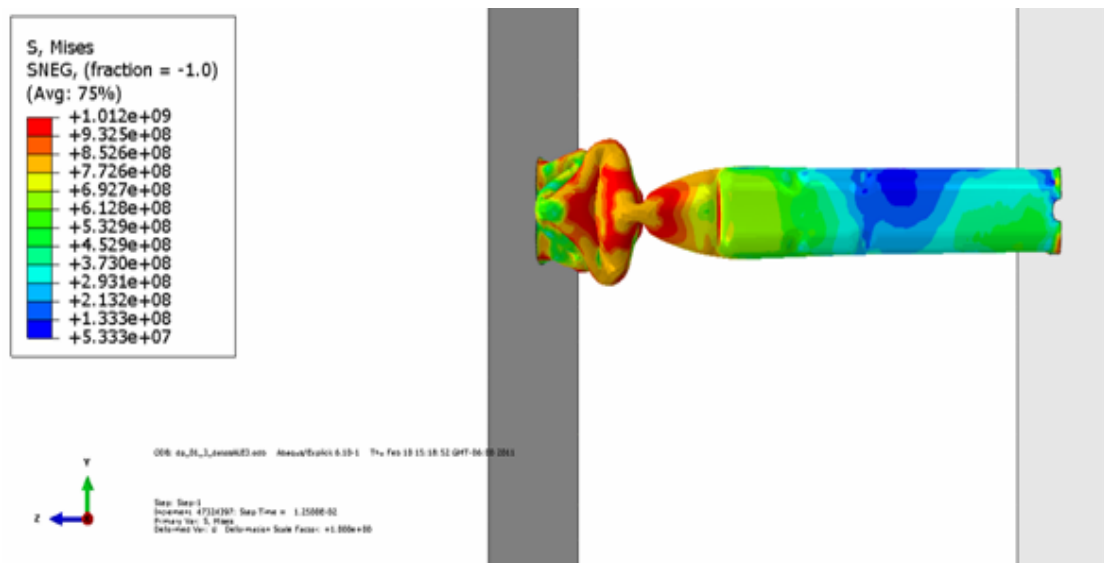


Figura C10 Compresión de pieza tubular de DP600, paso 20/20 (1012 MPa a 151.2 mm).

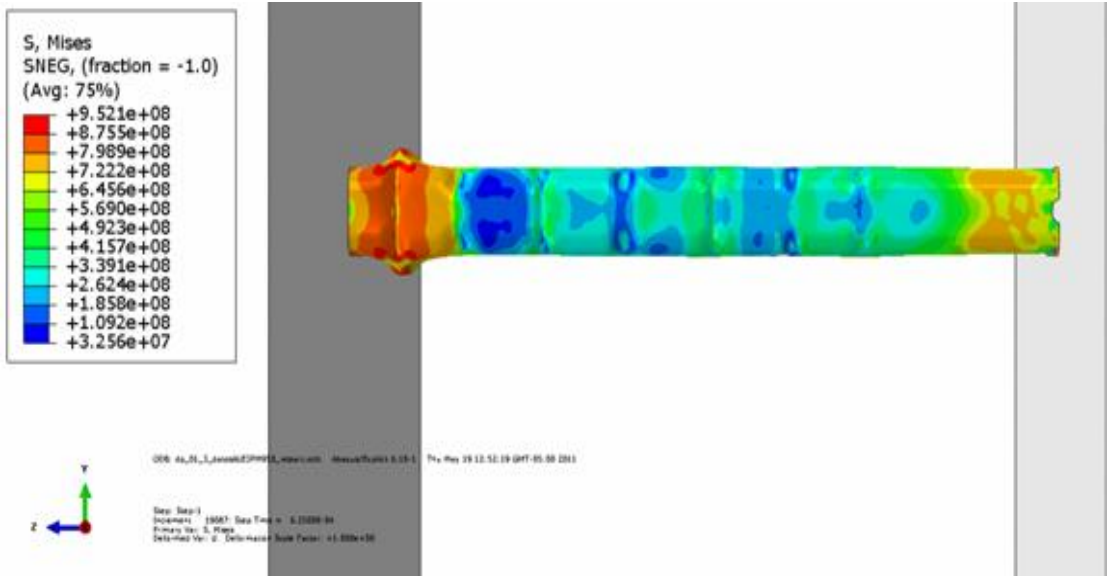


Figura C11 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 1/20 (952 MPa a 9.57 mm).

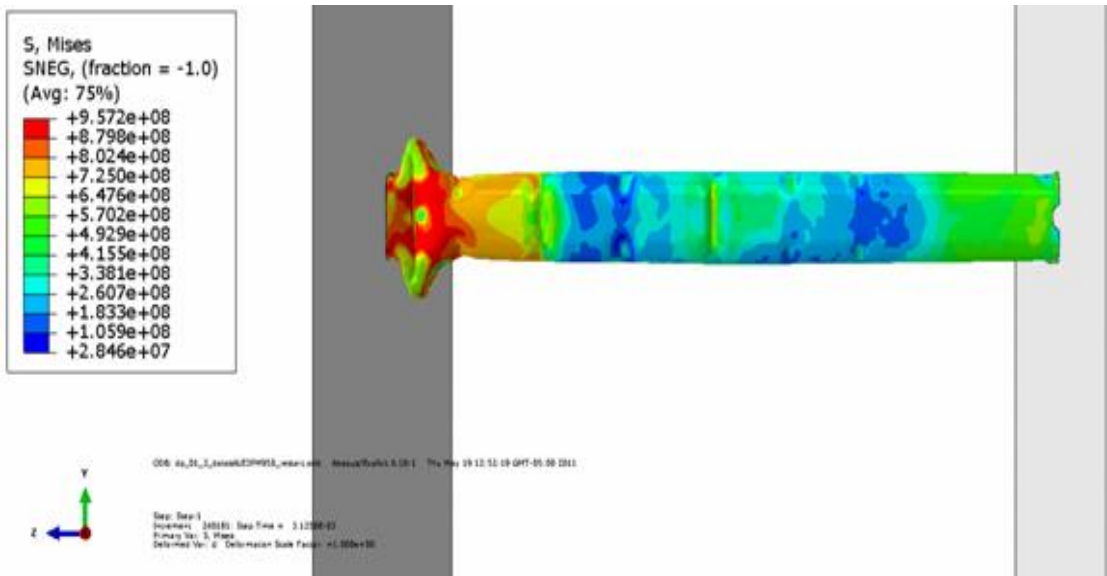


Figura C12 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 5/20 (957 MPa a 39.1 mm).

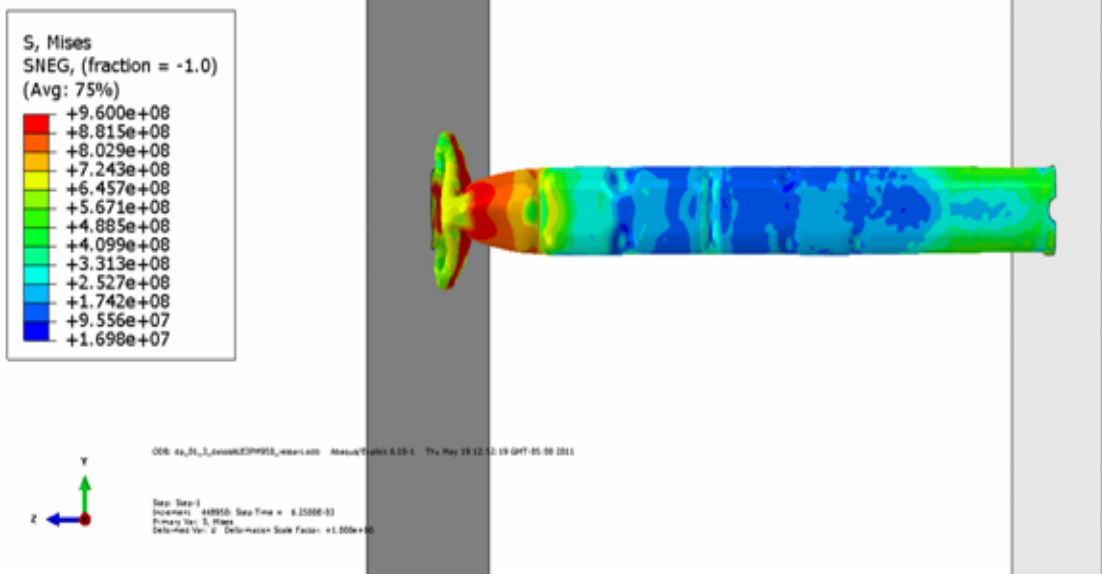


Figura C13 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 10/20 (960 MPa a 79.05 mm).

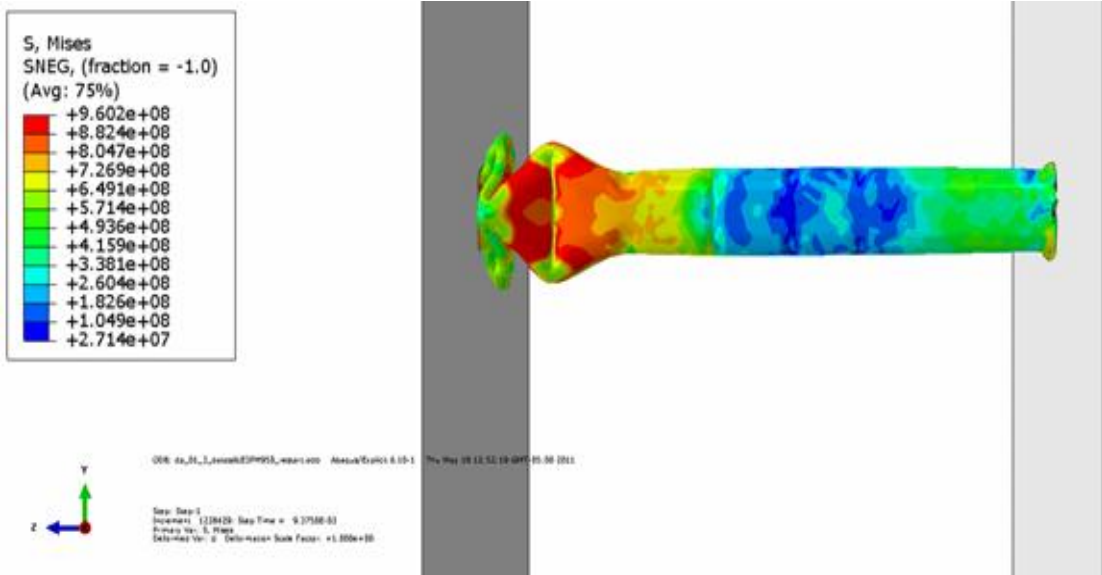


Figura C14 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 15/20 (960 MPa a 115.9 mm).

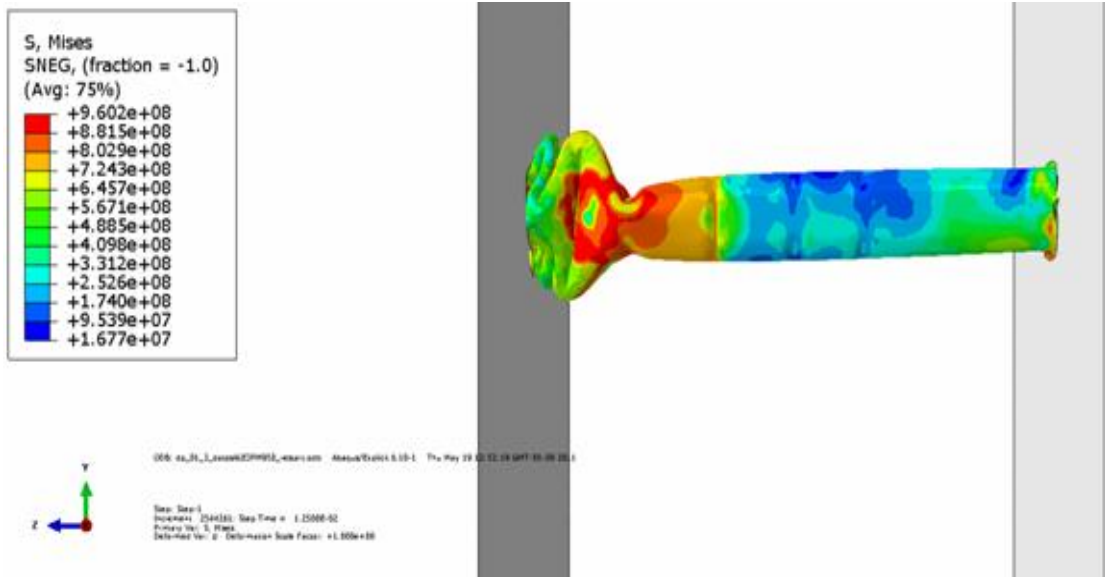


Figura C15 Compresión de pieza tubular de PM590, paso 20/20 (960 MPa a 156.8 mm).

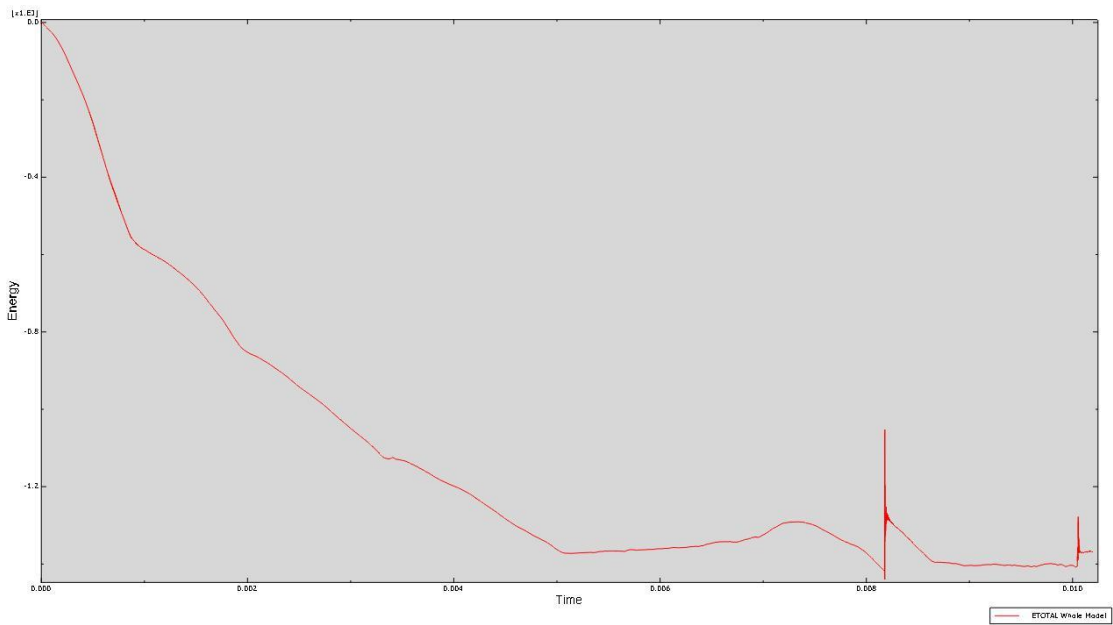


Figura C16 Absorción de energía de pieza tubular de HSLA

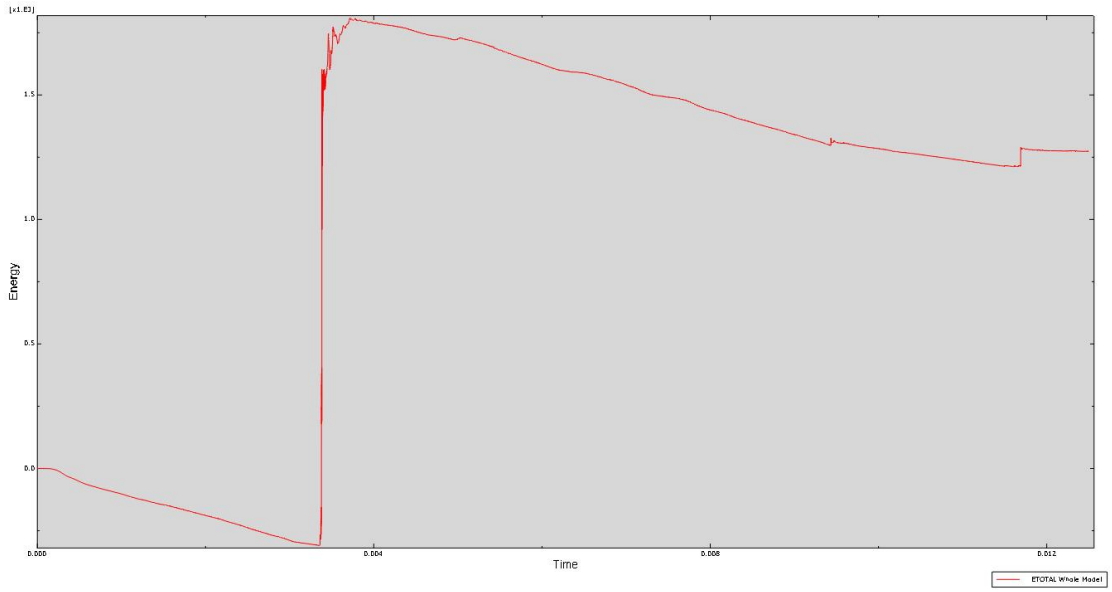


Figura C17 Absorción de energía de pieza tubular de DP600

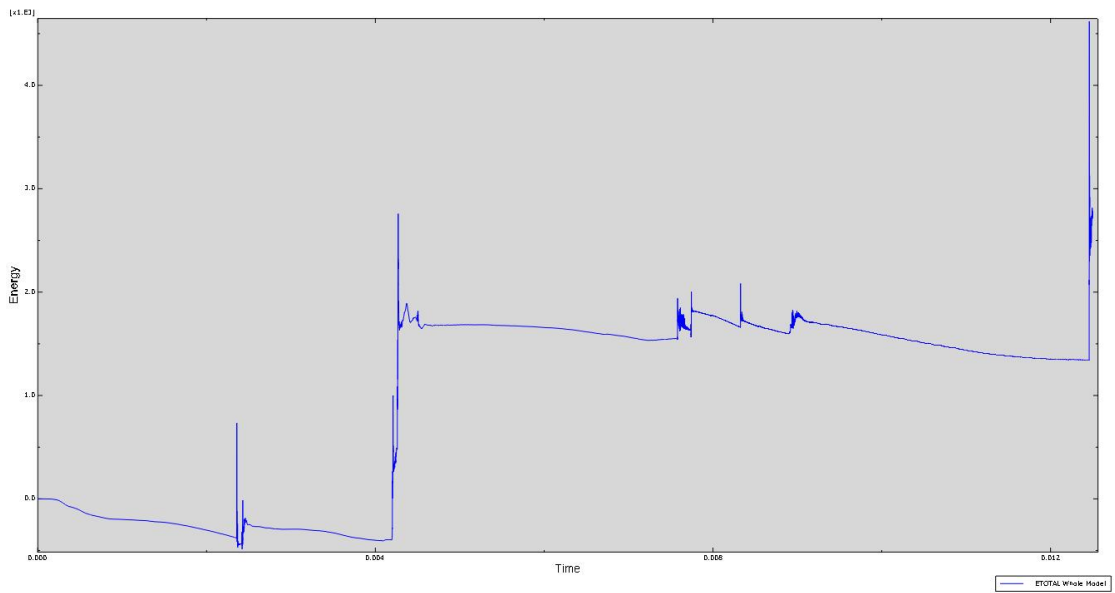


Figura C18 Absorción de energía de pieza tubular de PM590