

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención Fabricación de Autopartes de Vehículos

PROPUESTA DE UN MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA
BARRA ESTABILIZADORA DELANTERA DE LA SUSPENSIÓN. CASO DE ESTUDIO
CHEVROLET AVEO FAMILY 1.5 L.

José Omar Cabrera Escobar

Nota del autor

Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director Ing. Julio Cesar Leguisamo Milla, Msc

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

jcabrera.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, JOSÉ OMAR CABRERA ESCOBAR, con cédula de identidad 060396186-3, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNAIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

JOSE CABRERA ESCOBAR

C.I: 060396186-3

Índice de Contenidos

Declaración Juramentada	2
Índice de Contenidos.....	3
Índice de Tablas y Figuras	7
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción	12
Antecedentes	12
Estado del arte	14
Situación actual de la industria automotriz ecuatoriana	14
Sistema de suspensión.....	15
Barra Estabilizadora	17
Cinemática y dinámica del automóvil	18
Condiciones de Inestabilidad	20
Análisis de Carga y Esfuerzos.....	22
Análisis Estático	22
Análisis a Fatiga	23
Caracterización de la barra estabilizadora.....	24
Medición de Dureza.....	24
Microscopia Óptica.....	26
Espectrometría.....	28
Simulación Estática y a Fatiga de la barra estabilizadora en ANSYS	30
Método	31
Dimensionamiento de la barra estabilizadora	31

Caracterización del material de la barra estabilizadora.....	32
Análisis Metalográfico	32
Medición de dureza	37
Espectrometría.....	39
Simulación Estática y a Fatiga de la Barra Estabilizadora.....	42
Simulación Estática	42
Simulación a Fatiga	44
Resultados.....	46
Caracterización de la barra estabilizadora.....	46
Análisis Metalográfico	46
Medición de Dureza.....	47
Espectrometría.....	49
Identificación del Material de la barra estabilizadora y propuestas de materiales alternativos	
.....	50
Aceros Utilizados en la Industria Automotriz.....	51
Aceros Bohler	52
Aceros SKF.....	52
Análisis Analítico de la Barra Estabilizadora con Material Original.....	53
Cálculo de los esfuerzos a los que está sometida la barra estabilizadora	53
Velocidad máxima en una curva peraltada.....	54
Calculo de reacciones de la barra estabilizadora	55
Resultados Obtenidos de la Simulación de la Barra Estabilizadora y materiales alternativos	
propuestos.....	57
Determinación del mallado a utilizar en la simulación.	57

Para determinar el tamaño de malla que se va utilizar, se realiza una curva de convergencia factor de seguridad vs tamaño de malla, hasta observar cuando la curva se estabilice el punto donde se estabilice la curva nos dará el factor de seguridad real con el tamaño de malla correcto.....57

Se va a trabajar con el análisis estático de la barra estabilizadora acero AISI 5160 para determinar el tamaño de malla que se utilizara durante el proceso de simulación.....57

En la figura 36 se puede observar la curva de convergencia utilizada para determinar el tamaño de malla, en esta curva se puede observar que cuando el tamaño de la malla es de 0,001 el resultado se estabiliza, por lo tanto se va utilizar este tamaño de malla para la simulación en el software tanto estáticamente como a fatiga de la barra estabilizadora con las diferentes opciones de materiales.....57

AISI 5160 Simulación Estática.....58

AISI 5160 Simulación a Fatiga58

AISI 4337 Simulación Estática.....59

AISI 4337 Simulación a Fatiga59

AISI 4340 Simulación Estática.....60

AISI 4340 Simulación a Fatiga60

Validación de resultados obtenidos de la Simulación Estática y a Fatiga de la Barra Estabilizadora61

AISI 5160 Análisis Estático61

AISI 5160 Análisis a Fatiga.....62

Análisis Analítico de la Barra Estabilizadora con Materiales Alternativos65

AISI 4140 Análisis Estático65

AISI 4337 Análisis a Fatiga.....65

AISI 4340 Análisis Estático67

AISI 4340 Análisis a Fatiga.....	67
Selección de Material Alterno.....	70
Conclusiones:	73
Referencias.....	75
Simbología	77
Anexo A.....	79
Anexo B	80
Anexo C	81
Anexo D	83
Anexo E	85
Anexo F.....	87
Anexo G.....	95
Anexo H.....	97
Anexo I.....	99
Anexo J	103

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1 Condición de inestabilidad de una curva.....	20
Tabla 2 Especificaciones técnicas durometro.....	26
Tabla 3 Especificaciones técnicas del microscopio.....	27
Tabla 4 Especificaciones técnicas del espectrómetro.....	29
Tabla 5 Medición de dureza probeta 1.....	47
Tabla 6 Medición de dureza probeta 2.....	48
Tabla 7 Medición de dureza probeta 3.....	48
Tabla 8 Promedio de mediciones de dureza.....	48
Tabla 9 Resultados de la espectrometría aplicada al acero de la barra estabilizadora	49
Tabla 10 Comparación de la composición del acero de la barra estabilizadora y el acero 5160.....	50
Tabla 11 Pesos y Capacidades Aveo Family 1.5 litros	54
Tabla 12 Factor de Confiabilidad	63
Tabla 13 Tabla de resultados análisis estático y a fatiga	69
Tabla 14 Acero AISI 4340 propiedades.....	70

Figuras

Figura 1. Elementos suspendidos y no suspendidos. Recuperado de: (Montes de la Torre, 2013).....	16
Figura 2. Vehículo sin y con barra estabilizadora. Recuperado de: (FierrosClasicos.com, 2015).....	17
Figura 3. Barra estabilizadora.....	18
Figura 4. Oscilaciones el automóvil. Recuperado de: (Montes de la Torre, 2013)	19
Figura 5. Cargas respecto a su centro de gravedad. Recuperado de: (Phys, 1999)	20

Figura 6. Seguridad de teorías dinámicas. Recuperado de: (Budynas, 2012).....	23
Figura 7. Posiciones de Identador durante el ensayo de dureza. Recuperado de: (Valencia U. P., 2017).....	25
Figura 8. Durómetro Universal Huagin Modelo HBRV – 187,5 Kgf.	26
Figura 9. Microscopio metalográfico invertido marca Buehler 50x – 500x.....	27
Figura 10. Espectrometría. Recuperado de: (Web2feel, 2014).....	28
Figura 11. Espectrómetro Q2 ION.....	29
Figura 12. Entorno de Trabajo Workbench.	30
Figura 13. Barra estabilizadora original.....	32
Figura 14. Equipo de Desbaste de Probeta.	34
Figura 15. Probeta Sometida al Desbaste.	34
Figura 16. Proceso de desbaste.	34
Figura 17. Pulido de la probeta.....	35
Figura 18. Probeta montada sobre el microscopio.....	36
Figura 19. Probeta montada en el durómetro universal.	38
Figura 20. Pantalla de visualización del durómetro universal.	39
Figura 21. Pulidora con lija de circonio.....	40
Figura 22. Probeta Montada sobre el Espectrómetro.....	41
Figura 23. Modelo en el Módulo Static Estructural – Mechanical.....	42
Figura 24. Apoyos fijos de la barra estabilizadora.	43
Figura 25. Fuerzas de la barra estabilizadora.....	43
Figura 26. Mallado de la barra estabilizadora.....	44
Figura 27. Herramienta Fatigue Tool.....	44
Figura 28. Selección de datos para fatiga.	45
Figura 29. Muestras de la barra estabilizadora.	46

Figura 30. Microestructura de la barra estabilizadora parte recta a 500x atacada con nital 2.
46

Figura 31. Microestructura de la barra estabilizadora parte curva a 500x, atacada con nital 2.
47

Figura 32. Temperatura de Revenido. Recuperado de: (Valencia U. P., 2017).....51

Figura 33. Dimensiones aveo family 1.5 litros. Fuente: General Motors.....53

Figura 34. Relación de peralte, radio de curvatura y velocidad.....54

Figura 35. Cargas de barra estabilizadora. Recuperado de: (Jover, 2017)55

Figura 36 Curva de Convergencia.57

Figura 37. Análisis estático acero AISI 5160.58

Figura 38. Análisis a fatiga acero AISI 5160.....58

Figura 39. Análisis estático acero AISI 4337.59

Figura 40. Análisis a fatiga AISI 4337.59

Figura 41. Análisis estático AISI 4340.60

Figura 42. Análisis a Fatiga AISI 434060

Figura 44. Gráfica de un esfuerzo repetido. Recuperado de: (Budynas, 2012)64

Figura 45. Microestructura del acero 4340 a 500x. Recuperado de: (García, 2011).....71

Resumen

Debido a que en la normativa ecuatoriana se exige cada vez más la incorporación de autopartes nacionales, en la presente investigación se determinó un material alternativo que se pueda encontrar en el mercado nacional, para la construcción de la barra estabilizadora del Chevrolet Aveo Family 1.5 l. a partir de las propiedades del material original. Para esto se requirió de pruebas de dureza, microscopía óptica y espectrometría para caracterizar el material; estos ensayos se realizaron siguiendo procedimientos ASTM para garantizar repetibilidad en los resultados.

Con las propiedades y después de obtenido el modelo CAD, se simuló en el software ANSYS la barra estabilizadora, tanto de manera estática como a fatiga con las cargas que tiene la barra en su funcionamiento regular, de esta simulación se obtuvieron los factores de seguridad (estático y fatiga). Para poder validar estos resultados se realizó el estudio estático y a fatiga analíticamente.

De todo este proceso realizando un análisis comparativo de los factores de seguridad del material original y alternativos, se seleccionó un material alternativo que cumple con similares prestaciones que el original, teniendo la ventaja que este material se lo puede conseguir en el país.

Palabras clave: autopartes, repetibilidad, caracterizar, estática, fatiga, espectrometría.

Abstract

Due to the fact that the incorporation of national autoparts is increasingly required in Ecuadorian regulations, in the present investigation an alternative material was found that can be found in the national market, for the construction of the stabilizer of Chevrolet Aveo Family 1.5 l. From the properties of the original material. For the case of hardness tests, optical microscopy and spectrometry to characterize the material; These assays were performed following ASTM procedures to ensure repeatability in the results.

With the properties and after obtaining the CAD model, the stabilizer bar was simulated in the ANSYS software, both static and fatigue with the loads that the bar has in its regular operation, from this simulation the Static safety factors were obtained And fatigue). In order to validate these results, the static study and fatigue were analyzed analytically.

From all this process that makes a comparative analysis of the safety factors of the original and alternative material, an alternative material was selected that complies with the similar features that the original, having the advantage that this material can obtain in the country.

Key words: autoparts, repeatability, characterization, static, fatigue, spectrometry.

Introducción

La industria automotriz ha generado gran desarrollo tecnológico en los últimos 30 años, dado que contribuye al desarrollo nacional con inversiones, capacitación, tecnología y generación de divisas. Las ensambladoras en el país, debido a su alto grado de tecnificación, son reconocidas por sus productos de alta calidad en el mercado nacional e internacional (Inversiones, 2013).

De acuerdo a sus necesidades y a las posibilidades económicas, las plantas ensambladoras han desarrollado su propia tecnología. Esto les ha permitido montar instalaciones modernas que garantizan productos perfectamente acabados, y con mayor aporte nacional en comparación con los inicios de la industria, en 1973. Sin embargo, en años recientes su crecimiento se ha visto limitado, pues se observa que no todas las ensambladoras del país tienen el mismo nivel de desarrollo tecnológico. Las políticas de tecnología, de investigación y desarrollo no dependen de las decisiones de los empresarios ecuatorianos. En grado decisorio, dependen de los intereses y escenarios regionales que identifican y desean consolidar las transnacionales, con el fin de optimizar sus planes de mercado (Inversiones, 2013).

Antecedentes

A nivel mundial se han realizado investigaciones para estudiar el comportamiento del sistema de suspensión y la barra estabilizadora como una de las partes componente, es así que se tiene la investigación (Montes de la Torre, 2013) sobre el análisis mediante el método de elementos finitos de la barra estabilizadora de un camión que además de introducir en el funcionamiento de los sistemas de suspensión, realiza un estudio del comportamiento bajo carga de la barra estabilizadora con el programa de elementos finitos ANSYS, para ver cómo

trabaja la barra estabilizadora y donde se producen los mayores esfuerzos para compararlo después con los resultados obtenidos teóricamente.

Se tiene también otra investigación de gran importancia (Chávez Santibáñez & Martínez Mira , 2013) sobre el estudio del acero utilizado en una barra estabilizadora automotriz, en la cual se estudia las propiedades mecánicas de un acero que es utilizado como parte automotriz, para lo cual se realiza pruebas de dureza, microscopia óptica para poder determinar el tipo de acero del cual está hecha la barra estabilizadora.

Partiendo de estas investigaciones y teniendo como premisa la necesidad que tiene el país de producir autopartes se desarrolla la siguiente investigación que tiene como objetivo principal: Validar un material alternativo en la fabricación de la barra estabilizadora de la suspensión delantera de un Chevrolet Aveo Family Sedan 1.5 L, a través de la teoría de Goodman modificada y simulación por elemento finito, para la contribución a los objetivos del cambio de la matriz productiva del Ecuador, para esto se utilizará pruebas de Espectrometría, Dureza y Microscopia óptica para la caracterización del material y posterior simulación en el software Ansys con las propiedades del mismo, con el fin de determinar si las propiedades del material alternativo superan o igualan en su conjunto las propiedades del material original de la barra estabilizadora, a fin de poder construir la barra estabilizadora en el país y aumentar el porcentaje de autopartes nacionales de los vehículos y reducir el pago de aranceles.

Para cumplir el objetivo principal se propone: Caracterizar el material actual de la barra estabilizadora por medio de la espectrometría, análisis de dureza y microscopia óptica para la generación de la línea base.

Seleccionar un material alterno comercializado en el Ecuador, a partir de sus propiedades físicas - mecánicas para su evaluación con relación al material actual.

Simular el comportamiento de la barra estabilizadora a base del material propuesto mediante el diseño en software CAD y simulación por elementos finitos para la selección del mejor material alterno.

Analizar analíticamente el comportamiento de la barra estabilizadora por medio de la teoría de Goodman modificada, para su validación con los valores obtenidos en la simulación.

Estado del arte

Situación actual de la industria automotriz ecuatoriana.

El sector automotor tiene una participación importante en la economía del país debido a los ingresos que genera en todas las actividades económicas directas e indirectas que el sector involucra, de acuerdo a la AEADE (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador) se tiene 92 empresas autopartistas que generan alrededor de 4 710 puestos de trabajo.

Sólo en el caso de impuestos se estima que son alrededor de USD 400 millones, además de su impacto en la generación de empleo en las diferentes partes de su cadena, desde el ensamble hasta la distribución y venta. Se debe destacar que la industria automotriz ha impulsado a otras industrias del sector productivo como la siderúrgica, metalúrgica, metalmecánica, minera, petrolera, petroquímica, del plástico, vidrio, electricidad, robótica e informática, industrias claves para la elaboración de los vehículos. De este modo, el sector automotriz integra a diferentes actores, tanto para las firmas autopartistas proveedoras de partes y piezas; así como para las ensambladoras que son las firmas que imponen los estándares productivos de la cadena. En la actualidad, la contribución de la industria automotriz tiene un gran peso en el aparato económico nacional (Inversiones, 2013).

El cambio de la matriz productiva del país ha hecho que se hagan esfuerzos desde el gobierno para aumentar el porcentaje de autopartes que tienen los vehículos que se comercializan en el país, es así que se han emitido acuerdos como el 12010 del Ministerio de Industrias y Productividad en el que se hace conocer la metodología que se tiene para calcular

el MOE (Material Originario Ecuatoriano) esto con el ánimo de poder cuantificar el porcentaje de autopartes de fabricación nacional, e ir incrementando gradualmente año a año los mismos. También se tiene la Resolución N° 65 del COMEX (Comité de Comercio Exterior) en la que de acuerdo al Anexo II existe un mayor arancel a pagar, si menor es el porcentaje de producto ecuatoriano incorporado en la fabricación de vehículos.

De acuerdo a la AEADE (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador), la marca más vendida en el Ecuador es Chevrolet con un 49,52 % del mercado nacional, teniendo como su vehículo más vendido el AVEO Family 1.5 Litros, de este vehículo se tiene como uno de sus elementos principales en la seguridad en el manejo, a la barra estabilizadora, que permite mejorar la maniobrabilidad en curvas.

Sistema de suspensión

El sistema de suspensión de un automóvil se encarga de hacer más cómoda la marcha a los pasajeros, evitando que las oscilaciones del terreno se transmitan a la carrocería. Además, contribuye a la estabilidad del vehículo, manteniendo en contacto las ruedas con el terreno, mejorando la adherencia y la respuesta de la dirección. Sistema de suspensión de un vehículo.

El sistema de suspensión está diseñado para absorber las vibraciones producidas por el vehículo, por lo que debe poseer dos cualidades importantes: amortiguación y elasticidad. La primera evita que las desigualdades en el terreno se transmitan al vehículo en forma de golpes secos y la segunda impide un balanceo excesivo al reducir las oscilaciones del sistema elástico (Marcial, 2012). También se puede decir que el sistema de suspensión está compuesto por varios elementos que son: barra estabilizadora, barras transversales, tirantes de tracción entre otros, que tienen como función mejorar su comportamiento dinámico.

Además de soportar el peso del vehículo, los sistemas de suspensión en los vehículos desempeñan dos funciones principales: almacenar y absorber energía.

Cada una de estas dos funciones las realizan componentes distintos de la suspensión: los elementos elásticos de la suspensión son los encargados de almacenar la energía generada por la marcha del vehículo debido a las irregularidades del terreno, y los elementos amortiguadores de absorberla (Occidental, 2017).

En la figura 1 se pueden observar los elementos suspendidos y no suspendidos, entendiéndose como elementos suspendidos a todos aquellos elementos que son soportados por el sistema de suspensión estos son: chasis, carrocería, grupo motor, carga de equipaje y ocupantes entre otros. Los elementos no suspendidos son aquellos que son parte del sistema de suspensión y también aquellos que conectan el mismo con el suelo estos son: ruedas, ejes, frenos, elementos de transmisión entre otros.

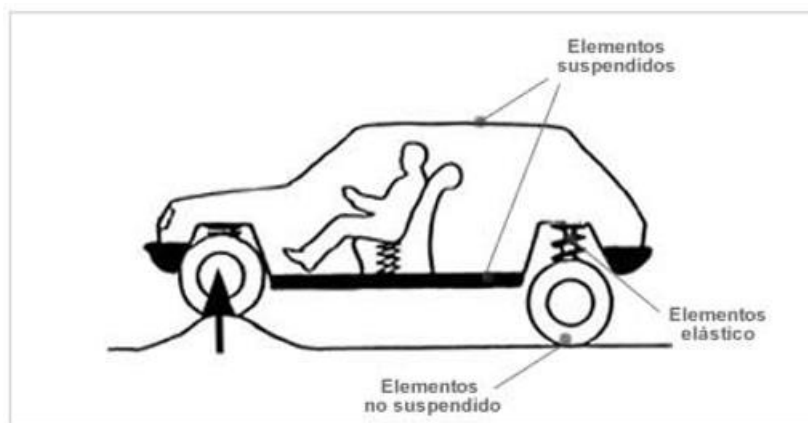


Figura 1. Elementos suspendidos y no suspendidos. Recuperado de: (Montes de la Torre, 2013)

En un recorrido recto, la masa suspendida (carga) que está constituida por los pasajeros, el chasis, grupo motor, carrocería, entre otros, esta soportada por el sistema de suspensión y la barra estabilizadora no actúa en este momento.

La suspensión automotriz está compuesta por una barra de acero (barra estabilizadora) que está unida a cada rueda de un mismo eje. Une a las dos ruedas de un mismo eje de forma que el movimiento de una de ellas forzara a la otra a girar en el mismo sentido. Esta barra limita el balanceo, porque, para que el bastidor se incline, debe comprimir el muelle de ese

lado y, en cierta medida, también el del opuesto (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2013).

Barra Estabilizadora

El trabajo de la barra estabilizadora consiste básicamente en controlar los movimientos de balanceo en curvas, de tal manera que su presencia influye notablemente en el comportamiento de los autos. En la figura 2 se puede observar el comportamiento de un vehículo sin y con barra estabilizadora.

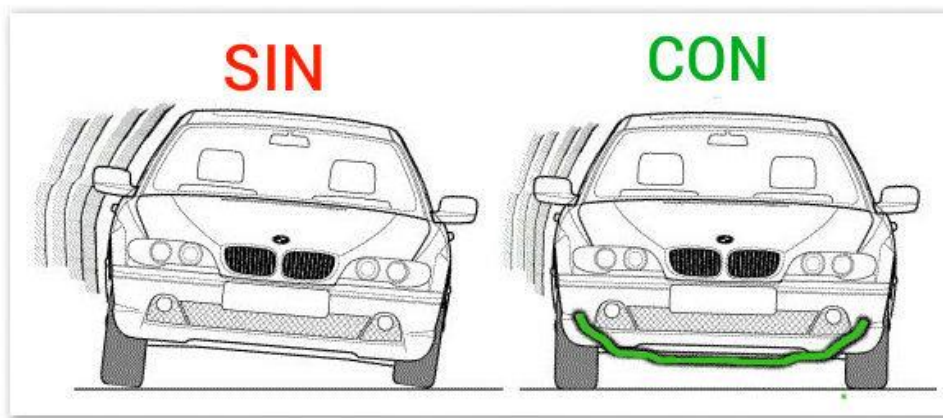


Figura 2. Vehículo sin y con barra estabilizadora. Recuperado de: (*FierrosClasicos.com*, 2015)

El rendimiento de la barra queda afectado por el lugar donde se encuentre su anclaje, el tipo de anclaje, y por supuesto, el diámetro y longitud de la barra. A mayor anchura, más plano gira el auto, siempre que se mantengan idénticos los muelles de la suspensión; sin embargo, el diámetro de la barra afecta a la comodidad y a la estabilidad, por lo que no puede incrementarse indefinidamente. Si bien hemos visto que la barra no entra en funcionamiento cuando las dos ruedas atacan al unísono una irregularidad, no sucede lo mismo cuando una rueda pasa por un bache y la del otro lado no. En esa circunstancia la barra sí actúa, poniendo rigidez en la suspensión y disminuyendo la comodidad.

La barra estabilizadora juega su papel primordial en las curvas para evitar el balanceo del vehículo. Su principal virtud es que no interviene frente a la presencia de

obstáculos transversales que afecten a las dos ruedas del mismo eje por igual. Gracias a ello no afecta al confort, y unos muelles blandos combinados con buenos amortiguadores absorberán esas irregularidades con suavidad.

En la figura 3 se puede observar una barra estabilizadora que es la encargada de detener la inclinación de la carrocería en una curva. Las curvas de diseño de la barra estabilizadora están de forma tal que la barra estabilizadora genere una contrafuerza al lado en el que se presenta la inclinación de la carrocería. Sin este componente se dificulta el tomar curvas a altas velocidades.



Figura 3. Barra estabilizadora.

Cinemática y dinámica del automóvil

Los movimientos a los que está expuesto un vehículo, se generan en su centro de gravedad y se propagan en distintos sentidos. Los tres tipos de oscilaciones existentes son:

- Empuje: se produce al pasar por terreno irregulares.
- Cabeceo: debido a las frenadas bruscas.
- Balanceo (inestabilidad): se genera al tomar curvas a alta velocidad.

En la figura 4, se muestran mediante flechas el punto de aplicación, dirección y sentido de las oscilaciones anteriormente señaladas.

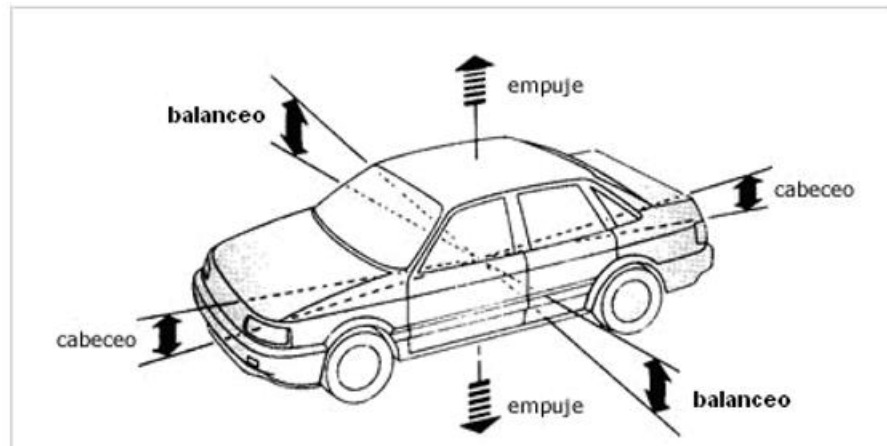


Figura 4. Oscilaciones el automóvil. Recuperado de: (Montes de la Torre, 2013)

Cuando se entra en una curva, durante su desarrollo, el vehículo está sometido, por un lado, a una fuerza centrípeta y, por otro lado, por la fuerza de inercia que actúa sobre el radio de la curva o fuerza centrífuga y que representa la tendencia del vehículo a abandonar su trayectoria. Dos fuerzas que dependen del trazado de la carretera, de la velocidad de traslación y de la masa del vehículo, incluida, la colocación de los pasajeros y carga. Para contrarrestar la tendencia del vehículo a salir de la carretera se construye los peraltes (Fundación, 2013). Peralte es la pendiente transversal que se da en las curvas a la plataforma de una carretera, con el fin de compensar con una componente de su propio peso, la inercia (o centrípeta), del vehículo, y lograr que la resultante total de las fuerzas se mantenga aproximadamente perpendicular al plano de la vía o de la calzada. El peralte viene estipulado por normativa. Tiene un máximo de 8 % en vías con velocidad de proyecto superior o igual a 100 km/h.

Para evaluar las condiciones de estabilidad del vehículo es necesario considerar dos hipótesis:

- Que el vehículo se deslice

- Que el vehículo se vuelque

En la tabla 1, se resume lo anterior, describiéndose el caso de inclinación del peralte, las posibles causas que motivan la pérdida de estabilidad.

Tabla 1

Condiciones de inestabilidad de una curva

<i>Hipótesis</i>	<i>Caso</i>	<i>Causas</i>	<i>Situaciones desencadenantes</i>
Deslizamiento	Exterior de la curva	- Velocidad excesiva - Peralte insuficiente - Bajo CRDt	Vehículos circulando a elevada velocidad en condiciones climáticas adversas
	Interior de la curva	- Peralte excesivo - Velocidad baja - Bajo CRDt	Vehículos circulando a baja velocidad en condiciones climáticas adversas
Vuelco	Exterior de la curva	- Alto rozamiento movilizado - Relación b/h baja - Velocidad elevada	Vehículos pesados circulando a velocidad elevada en condiciones climáticas favorables
	Interior de la curva	- Peralte excesivo - Alto rozamiento movilizado - Relación b/h baja	Vehículos pesados circulando a baja velocidad en condiciones climáticas favorables

Nota: (Jover, 2017)

Condiciones de Inestabilidad

Se representa el vehículo por el diagrama de cuerpo libre, que se muestra en la figura 5.

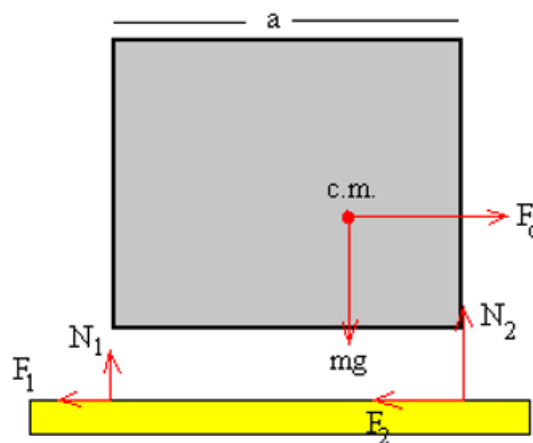


Figura 5. Cargas respecto a su centro de gravedad. Recuperado de: (Phys, 1999)

Donde:

N_1 y N_2 son las reacciones o fuerzas que ejerce la carretera sobre las ruedas del vehículo.

F_1 y F_2 son las fuerzas de rozamiento que se oponen al deslizamiento del vehículo a lo largo de la dirección radial y hacia fuera.

El peso ($m \cdot g$) del vehículo actúa en el centro de masas.

La fuerza centrífuga (F_c) actúa en el centro de masa.

Si el vehículo permanece en reposo a lo largo de la dirección radial, se tendrá que:

$$N_1 + N_2 = mg \quad (1)$$

$$F_c = F_1 + F_2 \quad (2)$$

Tomando momentos respecto de O. La condición de equilibrio se expresa:

$$-N_1 \times b - F_c \times y_c + mg \times X_c = 0 \quad (3)$$

Donde Y_c es la distancia desde un punto cualquiera al centro de gravedad en el eje y, X_c es la distancia desde el mismo punto al centro de gravedad en el eje x.

Siendo b la distancia entre las ruedas. Despejando N_1 de la ecuación 3 se tiene:

$$N_1 = \frac{mg \times X_c - F_c \times Y_c}{b} \quad (4)$$

Examinamos las distintas situaciones:

- El vehículo vuelca

A medida que aumenta la velocidad v del vehículo, aumenta la fuerza centrífuga,

$$F_c = \frac{m \times v^2}{R} \quad (5)$$

Hasta que N_1 se haga cero. Un incremento de la velocidad hace que el vehículo empiece a volcar.

De la ecuación 5, se define a V como velocidad del vehículo y R es el radio de la curva.

La condición para que empiece a volcar es:

$$N_1 = 0 \quad \text{ó} \quad \frac{v^2}{R} = \frac{g \times X_c}{Y_c} \quad (6)$$

- El vehículo desliza

La fuerza de rozamiento F_c no puede superar el valor máximo de:

$$\mu \times N_1 + \mu \times N_2 = \mu \times mg \tag{7}$$

Donde μ es el coeficiente de rozamiento.

La condición para que el vehículo empiece a deslizar es que:

$$\frac{v^2}{R} = \mu \times g \tag{8}$$

Si $m \times g \times X_c > F_c \times Y_c$ el vehículo no vuelca.

Si $F_c < \mu \times m \times g$ el vehículo no desliza.

Si $m \times g \times X_c > \mu \times m \times g \times Y_c$, es decir, si $\mu < \frac{X_c}{Y_c}$ el vehículo empieza a deslizar en el

momento en el que se cumple que $\frac{v^2}{R} = \mu \times g$.

Si $\mu > \frac{X_c}{Y_c}$ el vehículo empieza a volcar en el momento en el que se cumple que $\frac{v^2}{R} = \frac{g \times X_c}{Y_c}$.

.

Análisis de Carga y Esfuerzos

Los componentes automotrices están sometidos a cargas y estas a su vez producen esfuerzos, los mismos que pueden ser de tensión, tracción, flexión y torsión. En el caso de la barra estabilizadora se tiene esfuerzos de torsión. En el estudio de la barra estabilizadora, se realiza tanto el análisis estático como el dinámico.

Análisis Estático.

Para el cálculo de la tensión máxima de torsión se utiliza la ecuación 9:

$$Tmax = \frac{T.r}{J} \tag{9}$$

Donde: T es el par de torsión, r es el radio de torsión y J momento polar de inercia.

Para el análisis estático por ser el material de la barra dúctil, para encontrar el esfuerzo al que está sometido se emplea la teoría de la energía de distorsión y el esfuerzo de Von Mises el cual se determina mediante ecuación 7:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \tag{10}$$

Donde σ' es el esfuerzo Von Mises, σ_x es el esfuerzo normal en el eje x, σ_y es el esfuerzo normal en el eje y, τ_{xy} tensión de corte en el plano xy.

Conocido el esfuerzo de Von Mises se puede determinar el factor de seguridad mediante la siguiente ecuación 11:

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \tag{11}$$

Donde: S_y es el límite de fluencia del material, n factor de seguridad σ' esfuerzo de Von Mises

Análisis a Fatiga.

Se considera que el elemento está sometido a esfuerzos dinámicos repetidos que varía dentro de un máximo cuando el vehículo se encuentra en la curva y un esfuerzo cero cuando el vehículo está en trayectoria recta. La teoría de Goodman Modificada es la más utilizada por ser la teoría que ofrece mayor seguridad tal como se lo puede evidenciar en la siguiente figura 6.

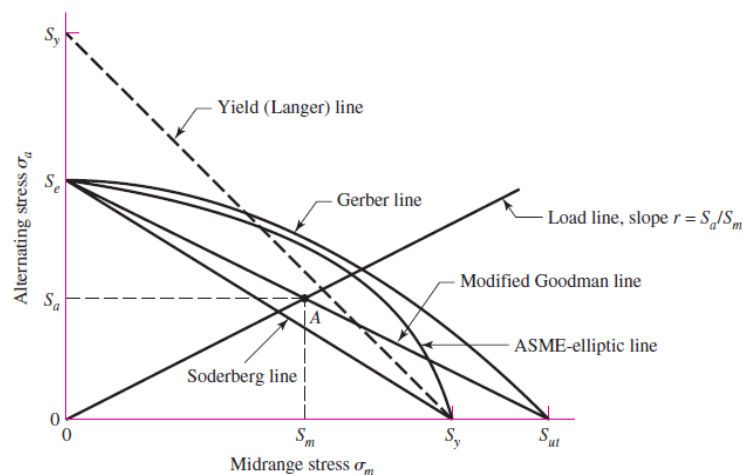


Figura 6. Seguridad de teorías dinámicas. Recuperado de: (Budynas, 2012)

La ecuación que rige la teoría de Goodman Modificado es la siguiente:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (12)$$

Donde σ_a la componente de la amplitud σ_m componente del esfuerzo medio S_e limite de fatiga S_{ut} limite de tracción y n factor de seguridad.

Caracterización de la barra estabilizadora

Para esta investigación se partirá con el método del análisis y síntesis para determinar mediante instrumentos metrológicos las dimensiones que tiene la barra estabilizadora, que permitan tomar las medidas para desarrollar el modelo de la barra en el software Ansys. Se continuará con el análisis de esfuerzos que actúan sobre la barra, los mismos que permitirán la validación del modelo construido en el Ansys y se realizara la caracterización del material, para disponer del criterio necesario para la selección de un material alternativo que se pueda conseguir en el mercado nacional.

La caracterización de materiales se refiere a la identificación de un material a partir del estudio de su microestructura, sus propiedades físicas y químicas. Existe para esto distintas técnicas de las cuales en el presente estudio se utilizarán: la medición de dureza, el análisis metalográfico y la espectrometría. (Ornelas, 2013)

Para las distintas pruebas que se requiere para la caracterización de la barra estabilizadora se utilizaron los equipos, medidor de dureza, microscopio óptico y espectrómetro del laboratorio de materiales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Medición de Dureza.

El ensayo de dureza mide la resistencia de la superficie de un material a ser penetrada por un objeto duro. Existe una diversidad de pruebas de dureza, son de uso común los ensayos Brinell y Rockwell.

A continuación podemos en la figura 7 se puede observar las distintas posiciones que se tiene durante el ensayo Rockwell.

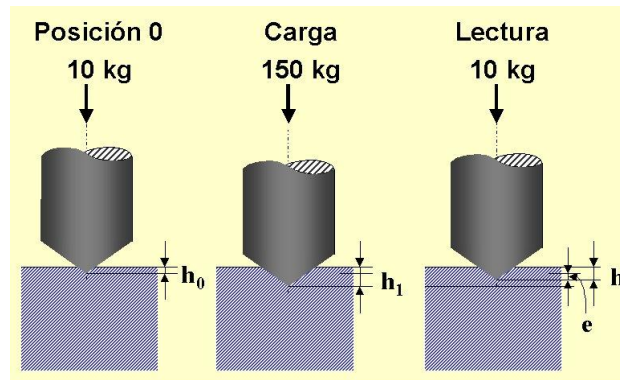


Figura 7. Posiciones de Identador durante el ensayo de dureza. Recuperado de: (Valencia U. P., 2017)

En el ensayo Rockwell la dureza de un material se determina por la profundidad de la huella h , es decir a menor profundidad de la huella mayor dureza.

Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos una fuerza que varía desde 60 a 150 kgf a compresión. Se retira la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice.

A continuación se puede apreciar en la figura 8 el durómetro universal de la marca Huagin Modelo HBRV con capacidad de 187,5 Kgf utilizado en la prueba.



Figura 8. Durómetro Universal Huagin Modelo HBRV – 187,5 Kgf.

En la tabla 2 podemos observar las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 2

Especificaciones Técnicas Durómetro

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DUROMETRO	
ESCALAS ROCKWELL:	HRA, HRB, HRC
FUERZA DE ENSAYO:	588N; 980,7 ; 1471
ENERGÍA:	AC 220V, 50/60HZ
ESPECIFICACIÓN:	MODELO HBRV

Microscopia Óptica.

Tiene como objetivo analizar en detalle la microestructura de los materiales y relacionarla con sus propiedades y características, y determinar su posible aplicación tecnológica.

Para realizar la microscopia óptica se necesita del microscopio óptico el cual nos facilita la visualización de la microestructura, tamaño de grano entre otras características del material a analizar. A continuación se presenta una figura 9 del microscopio metalográfico invertido de capacidad de 50x – 500x marca Buehler utilizado para realizar este ensayo. .



Figura 9. Microscopio metalográfico invertido marca Buehler 50x – 500x.

En la tabla 3 podemos observar las especificaciones técnicas del equipo:

Tabla 3

Especificaciones Técnicas del Microscopio

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MICROSCOPIO	
CAPACIDAD:	50 X - 500 X
OCULAR:	Campo amplio WF10X (18mm) y Campo amplio WF12,5X (14mm)
TUBOS OCULARES:	Trinocular con inclinación a 45° (analizador, diafragma de campo modificable)
UNIDAD DE ILUMINACIÓN VERTICAL:	6V 20W, bombilla halógena, con control de brillo.
SISTEMA DE ENFOQUE:	Torreta ajustable, Sistema de enfoque basto/fino coaxial con tensión ajustable, tope superior para no dañar la lente. División de enfoque fino de 0,7µm

Espectrometría.

Es la técnica que se utiliza para medir los porcentajes de los constituyentes químicos de una aleación. En estos casos, el instrumento que realiza tales medidas es un espectrómetro o espectrógrafo.

La excitación de la muestra se produce en el pequeño espacio existente entre un par de electrodos. El paso de electricidad entre los electrodos a través de este pequeño espacio proporciona la energía necesaria para atomizar la muestra y producir átomos o iones en estado electrónico excitado. Los electrones del analito excitados emiten luz en longitudes de onda características que se pueden dispersar con un monocromador y se detecta.

La técnica permite la determinación de la composición química de metales, mediante la vaporización de la muestra y el análisis de las chispas formadas. Los átomos e iones que se desprenden durante este proceso, son excitados y emiten una luz que se conduce hacia sistemas ópticos. En éstos, la luz se mide mediante un detector electrónico fotosensible CCD (Charge Coupled Device), que convierte la luz en cargas eléctricas.

A continuación en la figura 10 se presenta un esquema en el cual se puede evidenciar los elementos que intervienen en la espectrometría.

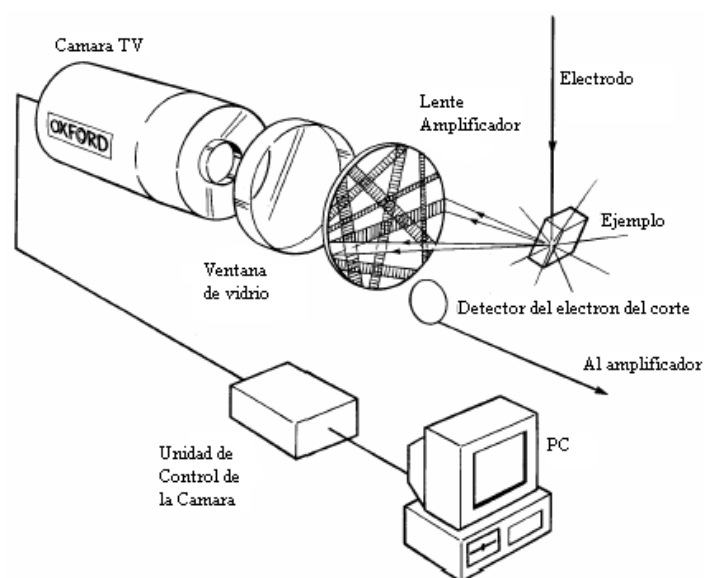


Figura 10. Espectrometría. Recuperado de: (Web2feel, 2014)

Para esta investigación se utilizara el espectrómetro Q2 ION de la marca Bruker este en un espectrómetro de chispa, este espectrómetro cubre elementos de aleación tales como: hierro, cobre, aluminio, bronce, laton entre otros. Dicho espectrómetro cuenta con una cámara de chispeo en donde ingresa la muestra, para la obtención de los resultados este espectrómetro utiliza un sistema llamado Compensación de Ambiente Activa (ACC) que proporciona una alta estabilidad a temperaturas de entre 10 y 45°C.

A continuación en la figura 11 se muestra el espectrómetro Q2 ION de la marca Bruker.



Figura 11. Espectrómetro Q2 ION.

En la siguiente tabla se puede observar las especificaciones técnicas del espectrómetro.

Tabla 4

Especificaciones Técnicas Espectrómetro

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESPECTROMETRO	
PESO :	44 LBS/ 20 KG
TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO:	10-45 C
TIPO:	OPTICO
ESPECIFICACIÓN:	Q2 ION
GAS UTILIZADO:	ARGON
COBERTURA TOTAL DEL ESPECTRO:	170 - 185 NM
RESOLUCIÓN:	30 PM
FRECUENCIA:	50 - 1000 HZ

Simulación Estática y a Fatiga de la barra estabilizadora en ANSYS

Ansyes es un software que utiliza análisis por elementos finitos que hace posible la solución de problemas que se puedan representar por ecuaciones diferenciales, las soluciones que se obtienen son soluciones aproximadas.

Para la simulación Estatica y a fatiga se parte del modelo CAD para después aplicar materiales, apoyos, cargas, mallados con el objetivo de mediante un proceso iterativo conocer resultados aproximados de un problema dado.

El entorno de trabajo de Ansyes es un entorno amigable para el diseñador se trabaja en dos entornor el Workbench y el Mechanical. En la figura 12 se puede observar el entorno Worbench.

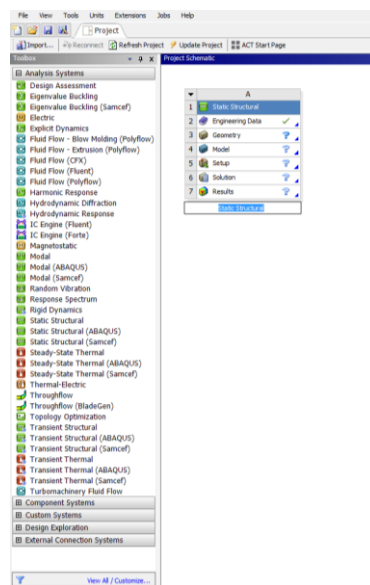


Figura 12. Entorno de Trabajo Workbench.

Método

Se han realizado una serie de investigaciones sobre el sistema de suspensión de los vehículos utilizando el método del elemento finito, pero cada vez se vuelve imprescindible profundizar en el estudio de cada uno de los diferentes elementos que componen este sistema con el fin de comprender en forma clara su función y tratar de optimizar su geometría.

Se ha investigado sobre el comportamiento de una barra estabilizadora de un camión y se ha llegado a determinar que las mayores tensiones se concentran en la zona de curvatura de la barra, así como en los estrechamientos, lo cual es bastante lógico teniendo en cuenta que son puntos de concentración de tensiones. En ellos, se observan valores de entre 780 y 880 MPa para el caso en que el vehículo toma la curva peraltada a 50 km/h y de entre 550 y 650 MPa cuando lo hace a 80 km/h, luego en caso de querer analizar la falla del elemento estas serían las zonas principales de análisis (Montes De La Torre, 2010).

Resulta interesante predecir el comportamiento de la barra estabilizadora ahora en un vehículo pequeño que puede desplazarse a mayores velocidades lo que podría afectar el valor de los esfuerzos y su localización

En esta investigación se pretende buscar materiales alternativos para la fabricación de la barra estabilizadora del Chevrolet Aveo Family, para lo se procede a su dimensionamiento, determinación de esfuerzos en base a su capacidad de carga y peso del vehículo, la modelación en Ansys y su simulación.

Dimensionamiento de la barra estabilizadora

El dimensionamiento de la barra estabilizadora se lo realizó en la empresa Calpelab Cia.

Ltda. empresa ecuatoriana, que cuenta con los instrumentos metrológicos necesarios para la toma de medidas de la barra estabilizadora, las mismas que fueron necesarias para el dibujo CAD 3D de la misma. En la figura 13 se muestra la barra estabilizadora original objeto de estudio de la presente investigación.



Figura 13. Barra estabilizadora original.

Caracterización del material de la barra estabilizadora

Análisis Metalográfico.

El ensayo metalográfico consiste en el estudio de la constitución y estructura de los metales y aleaciones.

Este ensayo, se basa en la observación de la superficie bajo el microscopio previamente atacada, con el fin de determinar las estructuras microscópicas y evaluar cualquier posible tratamiento térmico de ser el caso.

Para realizar el análisis metalográfico se sigue el procedimiento establecido en la norma ASTM E3-2017 Preparation for Metallographic Specimens. El objetivo de este procedimiento es analizar en detalle la microestructura de los materiales y relacionarla con sus propiedades y características, y determinar su posible aplicación tecnológica.

Este análisis, se realizó mediante el siguiente procedimiento:

1. Corte de las muestras, en este caso de la parte recta y de la parte curva, mediante un disco abrasivo.
2. Limpieza con un disolvente para retirar la presencia de aceites o grasas.
3. Desbaste de las muestras, utilizando una lijadora de cuatro carriles, provista de lijas 320, 400, 600 y 1000.
4. Pulido de las muestras sobre el paño del disco abrasivo, colocando el abrasivo alúmina mezclado con agua.
5. Ataque de las probetas con Nital por 10 segundos.

6. Observación bajo el microscopio.

A continuación, se procede a detallar cada una de las etapas de este procedimiento:

Corte de la muestra. - Por lo general, se deben cortar varios trozos pequeños del material a examinar, si el material es redondo como en este caso, 13 a 25 mm² aproximadamente, la altura de la muestra no debe ser mayor que la necesaria para el manejo durante el desbaste y pulido (Ornelas, 2013)

La ubicación de las muestras y la forma en que se corten afectarán los resultados y su interpretación. Dependiendo del tipo de pieza a examinar se determina el lugar de dónde extraer las muestras. Por ejemplo: Si se estudian perfiles o barras laminadas, deben extraerse probetas de sus extremos y parte media. En una varilla de acero estirado en frío se pueden obtener las muestras de tal forma que quede expuesta una sección transversal o una longitudinal, y ambas secciones variarán notablemente su aspecto. Se cortan tres muestras de la barra estabilizadora para el análisis

De acuerdo a la normativa ASTM E3-2017, el diámetro de la muestra debe ser de entre 0,5 a 1 plg y la altura debe ser la necesaria para poder trabajar con la probeta para este caso de estudio se tiene una probeta de 0,67 plg.

Limpieza. - Las muestras o probetas deben ser limpiadas de grasas y aceites con un disolvente orgánico adecuado, además se debe tener cuidado de no tener presencia de alguna cubierta metálica en la zona de estudio, finalmente hay que evitar que exista la presencia de óxido.

Desbaste. Luego la probeta se someter a un desbaste mediante el empleo de papeles de esmeril de muy buena calidad. Los papeles de esmeril usados en metalografía se clasifican de acuerdo al tamaño de sus partículas, entre otras formas con los números 320-400-600-1000. Este proceso se efectúa utilizando granos cada vez más finos de lija metalográfica para esmerilar. Se utilizan papeles de grano 320 en adelante. En la figura 14, que se presenta a continuación se presenta el equipo que se utilizó para realizar el desbaste de las probetas.

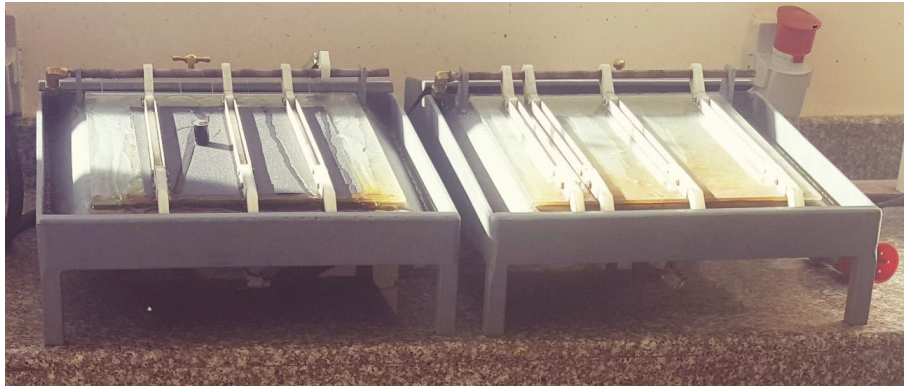


Figura 14. Equipo de Desbaste de Probeta.



Figura 15. Probeta Sometida al Desbaste.

Cuando se termina de esmerilar con un papel de lija, las marcas deben estar todas en la misma dirección. Antes de proseguir con la siguiente lija más fina, deben lavarse la muestra como las manos del operario. Ahora la muestra debe desplazarse en forma tal que las rayas hechas por las distintas lijas formen ángulos rectos con las del inmediatamente anterior. En la figura 16, que se muestra a continuación se presenta el proceso de desbaste de la probeta.

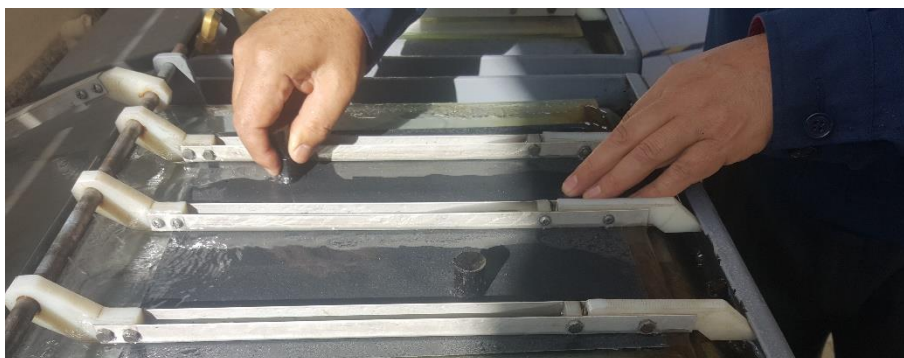


Figura 16. Proceso de desbaste.

Así, puede verse con claridad si se han eliminado las rayas más gruesas que se hicieron en la operación anterior. El desbaste se da por terminado cuando se obtiene una cara perfectamente plana,

con rayas muy finas en toda la superficie, producidas en un solo sentido, por el papel de esmeril de mayor finura.

Pulido.- Se hace con el objetivo de eliminar todas las rayas finas producidas durante el desbaste, tendiendo a obtener una superficie especular. Se procede a hacer el pulido solo después de lavar con sumo cuidado tanto las manos como la muestra, a fin de evitar cualquier contaminación en el plato de pulido. Este procedimiento se basa en el uso de un plato cubierto con una tela (o paño), cargada con una suspensión de alúmina (Al_2O_3). Al principio, la muestra se sostiene en una posición sobre la rueda, sin girar la muestra, hasta que se hayan eliminado la mayoría de las rayas anteriores producidas en el desbaste. Luego puede hacerse girar con lentitud en sentido contrario al de rotación de la rueda, hasta que solo puedan verse las marcas de alúmina.



Figura 17. Pulido de la probeta.

Ataque.- Este permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque, pero el más utilizado es el ataque químico. El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo. Luego se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio, y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

Existen reactivos generales para detectar la estructura de cada grupo de aleaciones: Aleaciones ferrosas (fundiciones y aceros), se atacan con nital tal como se lo puede observar en el Anexo. Cuya composición química es la siguiente:

- Ácido nítrico 1-5 c.c.
- Alcohol etílico o metílico (95% o absoluto)...100 c.c.

El tiempo de ataque va desde pocos segundos hasta 1 minuto, para todos los aceros al carbono y de baja aleación. Oscurece la perlita y manifiesta los bordes de la ferrita (ferrita y cementita blancos y perlita más oscura, láminas claras y oscuras). (Industriales, 2015).

Observación microscópica.- La muestra se coloca en la placa de un microscopio metalúrgico, de modo que la superficie de la muestra sea perpendicular al ojo óptico. Puede observarse con ampliaciones diferentes, y elegir la adecuada. A continuación se puede ver en la figura 18 la probeta montada sobre el microscopio.



Figura 18. Probeta montada sobre el microscopio.

Si se examina con un aumento de 500x debe aparecer claramente el micro constituyente perlita, en una muestra de acero completamente recocido. Puede tomarse una imagen de la microestructura. Si la muestra no ha sido bien atacada por el ácido, el aspecto de la perlita será prácticamente invisible o

muy débil. Si el ataque ha sido excesivo la perlita tendrá un aspecto muy negro. Se puede hacer un repulido rápido y un nuevo ataque (Ingeniería, 2015).

De acuerdo a la normativa no se establece un número de muestras necesarias para poder realizar este ensayo por lo que se realice una microscopia a cada probeta teniendo un total de 3 probetas.

Medición de dureza.

Luego de realizar el análisis metalográfico, se determinó la presencia de martensita revenida, de lo que se deduce que la barra fue tratada, por lo que se procede a utilizar el método de dureza Rockwell C (Hrc) recomendado para aceros tratados.

Para realizar la medición de dureza se sigue el procedimiento establecido en la norma ASTM E18-16 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

El procedimiento para el ensayo de dureza Rockwell C, utilizado fue el siguiente:

1. Cortar las muestras en longitudes de 15 mm como mínimo.
2. Dejar las superficies paralelas entre sí, para facilitar la medición de dureza.
3. Seleccionar el indentador para esta medición, el cono de diamante de 120 °.
4. Verificación de la calibración del equipo sobre el bloque patrón.
5. Colocar la muestra sobre el soporte de durómetro
6. Aplicar la precarga de 10 Kg
7. Aplicar la carga de ensayo de 150 kg
8. Retirar la carga y la probeta del soporte
9. Lectura de resultados sobre la pantalla del equipo.

A continuación, se pasa a detallar lo más relevante del ensayo.

En este ensayo se utilizó como cuerpo de penetración un cono de diamante de 120 °. Al igual que para el análisis metalográfico la probeta debe ser preparada de la misma forma, claro está que para esta medición se debe obviar el ataque químico, ya que el objetivo es simplemente tener superficies planas. El cuidado que se debe tener es que las dos superficies planas de la

probeta sean paralelas si no se va a tener errores en la medición. De acuerdo a la normativa la prueba debe realizarse a una temperatura de 10 a 35°C porque temperaturas fuera de este rango podrían afectar los resultados.

Corte de la muestra. - se realiza el corte de la muestra de una dimensión que sea maniobrable y que puede ingresar en la cámara de ensayo del durómetro universal. En la figura 19, se puede ver la probeta montada en el durómetro universal antes de realizar el ensayo. Se cortaron muestras del extremo y centro de la barra estabilizadora.



Figura 19. Probeta montada en el durómetro universal.

Verificación en el bloque patrón. - Antes de realizar la medición de dureza se verifica la calibración del equipo, midiendo la dureza sobre un bloque patrón, este bloque tiene una dureza ya establecida, con lo que se puede comparar la dureza de este ensayo previo con la dureza del bloque establecida. Si no concuerdan estas dos medidas, se procede a la calibración del equipo. Si las medidas son las mismas montamos la probeta en el durómetro universal. Como se determinó que el acero era tratado, por la observación metalográfica, se seleccionó la escala Hrc.

Aplicación de Precarga.- se aplica una precarga a la probeta para referenciar la altura inicial de penetración. Se aplicó una precarga de 10 Kg

La probeta debe ser fijada de manera que durante la prueba no exista ningún tipo de desplazamiento.

Aplicación de Carga.- se aplica la carga dependiendo del material a ensayar, con un cuerpo de indentación que es una bola de acero templado o un cono de diamante, dependiendo de la dureza del material. La carga de ensayo fue de 150 kg.

Lectura de resultados.- Los resultados se los puede tomar de la pantalla sin necesidad de realizar ninguna operación. La observación de los resultados se la debe hacer de manera perpendicular a la pantalla, se vemos la pantalla con un ángulo esto va afectar la toma del resultado. A continuación se puede ver una imagen de la pantalla de visualización de la dureza. De acuerdo a la norma ASTM E18-16 se debe realizar tres lecturas para determinar la dureza.

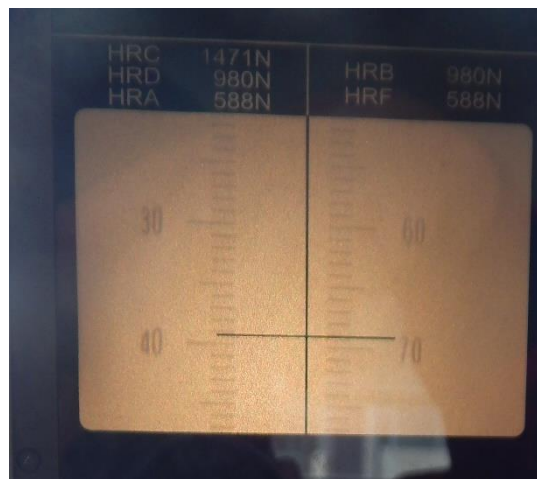


Figura 20. Pantalla de visualización del durómetro universal.

Finalmente se retiró la carga y la muestra del soporte

Espectrometría.

Para realizar la espectrometría se utilizara el procedimiento descrito en la norma ASTM E 415-15 Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel

Procedimiento del ensayo de espectrometría:

1. Corte de las probetas (muestras)

2. Desbaste de la probeta en un disco con lija de circonio
3. Limpieza de la probeta con alcohol y aire comprimido.
4. Preparación del software
5. Preparación del equipo, mediante la purga de argón UPG-5.0, y se ubica el electrodo para matriz de hierro.
6. Colocación de la probeta sobre el agujero por el cual pasa el disparo contra la probeta
7. Disparos sobre la probeta en tres zonas diferentes
8. Impresión de la hoja de resultados

A continuación, se detallan estas etapas:

Corte de las probetas. - El tamaño de las probetas debe ser el adecuado para que se puede superponer y sellar el orificio de la chispa de acuerdo a la norma, la probeta debe tener un diámetro mínimo 15 mm y un espesor de 10 a 38 mm.

Desbaste de la probeta.- La probeta se debe desbastar hasta tener una superficie plana, finalmente se realiza un desbaste con una lija con revestimiento de circonio ya que el circonio no afecta la toma de mediciones durante la prueba ya que el espectrómetro utilizado en esta prueba no detecta este material. En la imagen que se muestra a continuación se puede observar la pulidora provista de la lija de circonio.



Figura 21. Pulidora con lija de circonio.

Limpieza. - Se limpia la muestra con algodón empapado de alcohol y se la seca con aire comprimido.

Preparación del software. - Se debe preparar el software de acuerdo al material que se va a realizar la prueba.

Preparación del equipo. - Se crea el ambiente inerte necesario para el ensayo mediante la purga de argón UPG-5.0, y se ubica el electrodo para matriz de hierro.

Colocación de la probeta. - Se coloca la probeta sobre el agujero por el cual pasara la chispa del disparo contra la probeta

Realización del ensayo. - Se aplica disparos sobre la probeta en tres zonas diferentes

Visualización de resultados. - En la computadora se visualizan los resultados, se verifica que los valores tengan una desviación estándar menor de 5 y se imprime el reporte de resultados.

Preparación del equipo.- se debe posicionar el electrodo del espectrómetro de manera que se tenga una alineación correcta en la rendija de entrada

Una vez que se tiene preparada la probeta se realiza el montaje de la muestra en el espectrómetro Q2 ION de la marca Bruker, como se muestra a continuación en la figura 22.



Figura 22. Probeta Montada sobre el Espectrómetro.

Se procede a realizar el disparo del espectrómetro, obteniendo la composición química de la probeta analizada.

Simulación Estática y a Fatiga de la Barra Estabilizadora

Se ha identificado que el acero original de la barra estabilizadora es el AISI 5160, con este material y conociendo las fuerzas a las que está sometida la barra estabilizadora se procede a simular estática como a fatiga la barra estabilizadora con el objetivo de conocer el factor de seguridad que va a ser el parámetro de comparación con el material alternativo.

Simulación Estática

Para la simulación estática se utiliza el módulo Static Structural del software Ansys, se define las propiedades que tiene el material a utilizar en el análisis, luego de esto seleccionamos el sólido con el que se va a trabajar y posteriormente se abre el modelo en el modulo Static Structural – Mechanical tal como se lo puede observar en la siguiente figura 23.

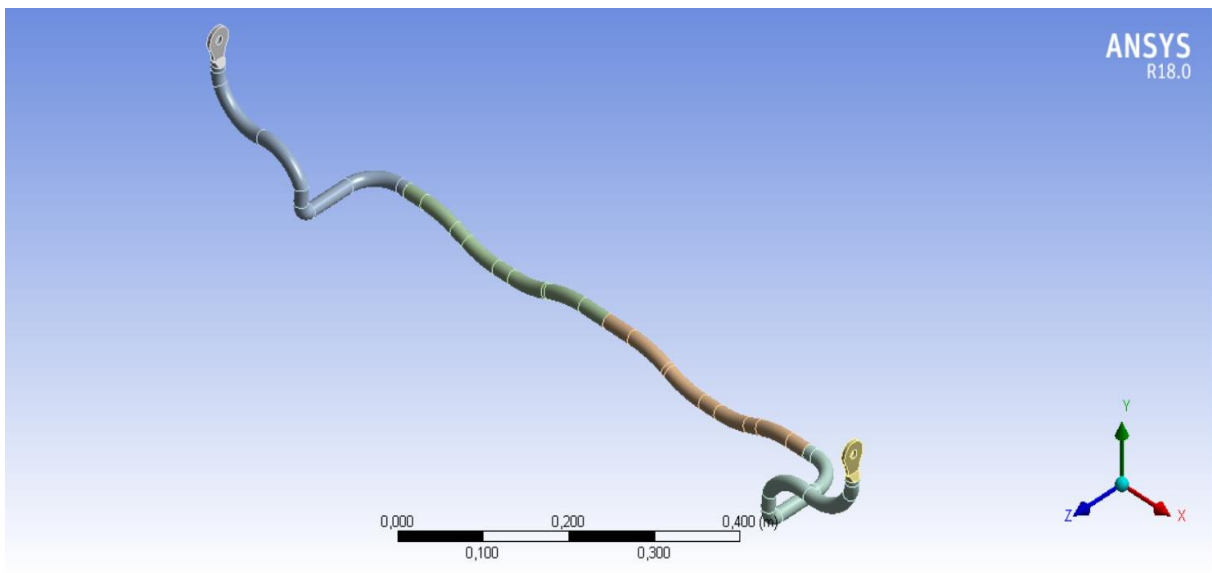


Figura 23. Modelo en el Módulo Static Estructural – Mechanical.

Posteriormente se procede a ubicar los apoyos fijos de la barra estabilizadora como se puede evidenciar en la siguiente figura 24.

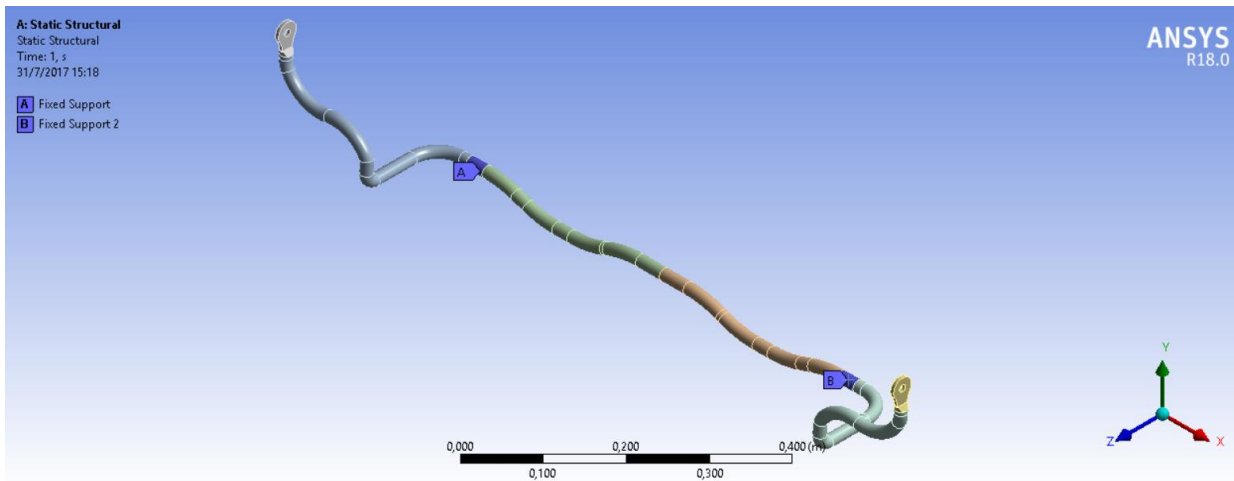


Figura 24. Apoyos fijos de la barra estabilizadora.

A continuación se procede a colocar las fuerzas a las que está sometida la barra estabilizadora como se muestra en la figura 25.

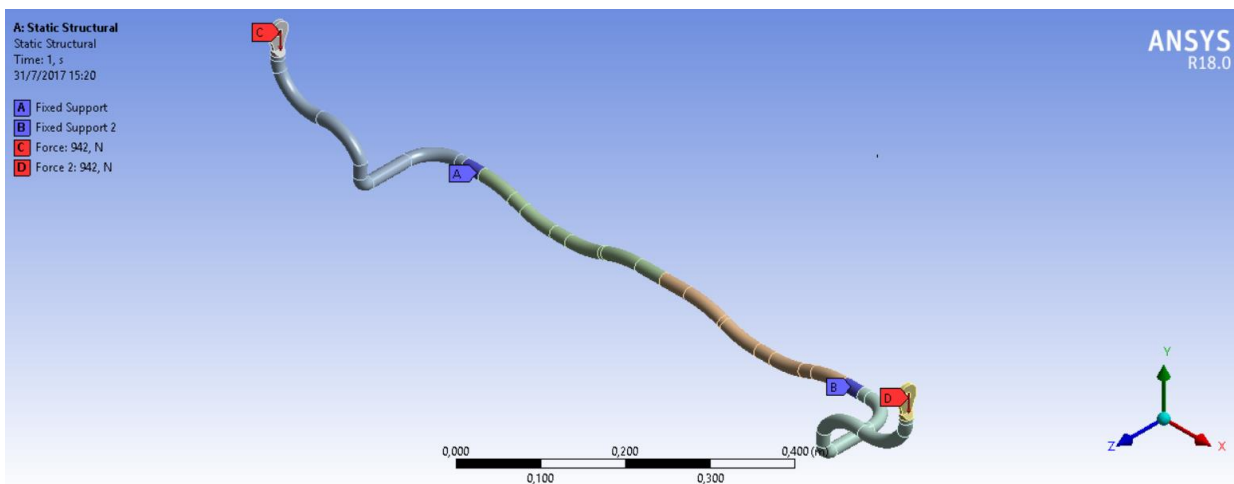


Figura 25. Fuerzas de la barra estabilizadora.

Una vez ubicados los apoyos y las fuerzas correspondientes se procede al mallado de la barra estabilizadora como se presenta en la figura 26.

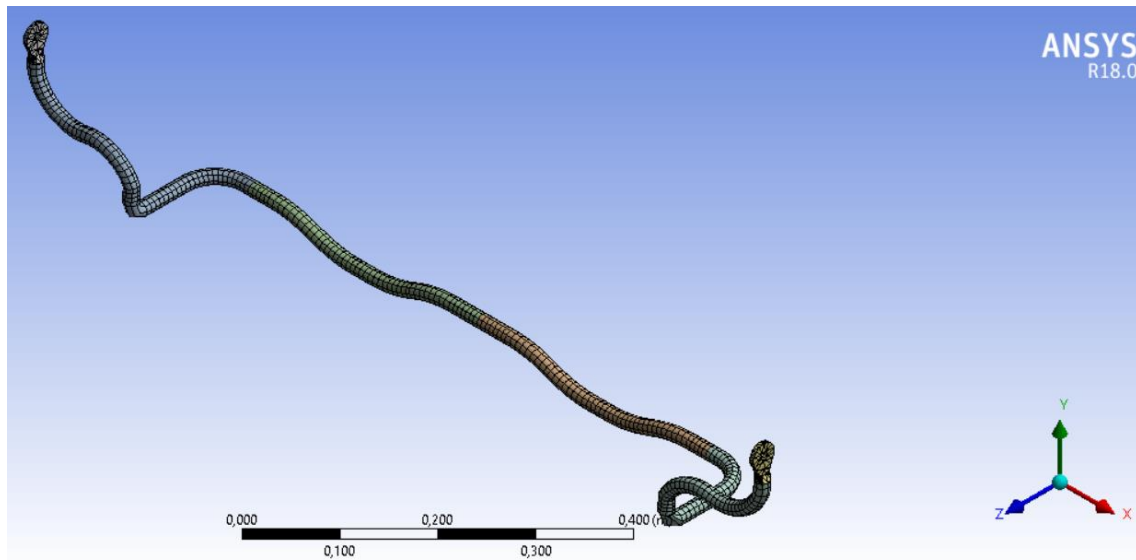


Figura 26. Mallado de la barra estabilizadora.

Para determinar el tipo de mallado que se necesita se utiliza una curva de convergencia para observar el momento en el que se estabilizan los resultados, siendo este punto el que se toma como tamaño de la malla. Para esto seleccionamos la geometría que necesitamos realizar el mallado.

Finalmente se ejecuta el análisis para poder visualizar los resultados.

Simulación a Fatiga

Para la simulación a fatiga, una vez hecha la simulación estática, seleccionamos la herramienta fatigue tool tal como se muestra en la figura 27.

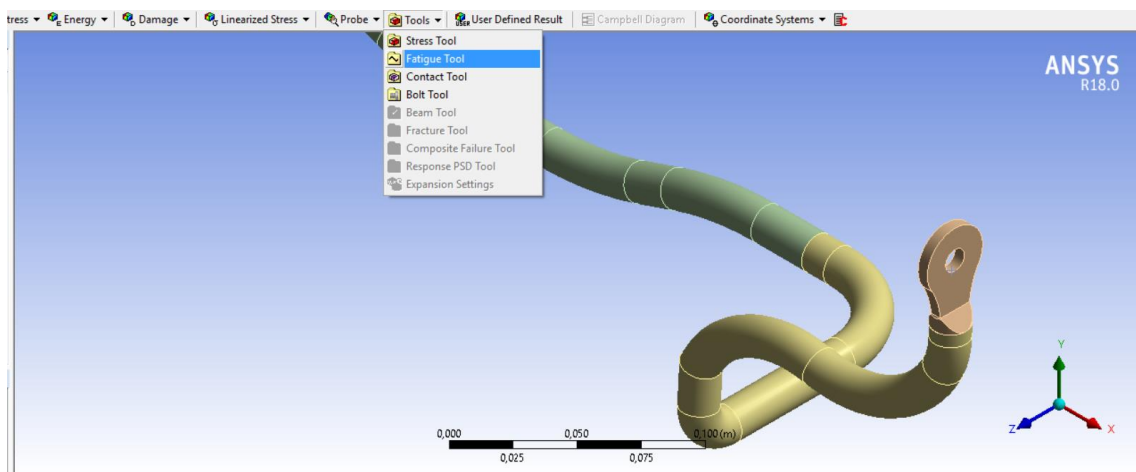


Figura 27. Herramienta Fatigue Tool

A continuación seleccionamos el tipo de esfuerzo que para este caso es basado en 0, y la teoría a utilizar que para este caso es Goodman, tal como se muestra en la figura 28.

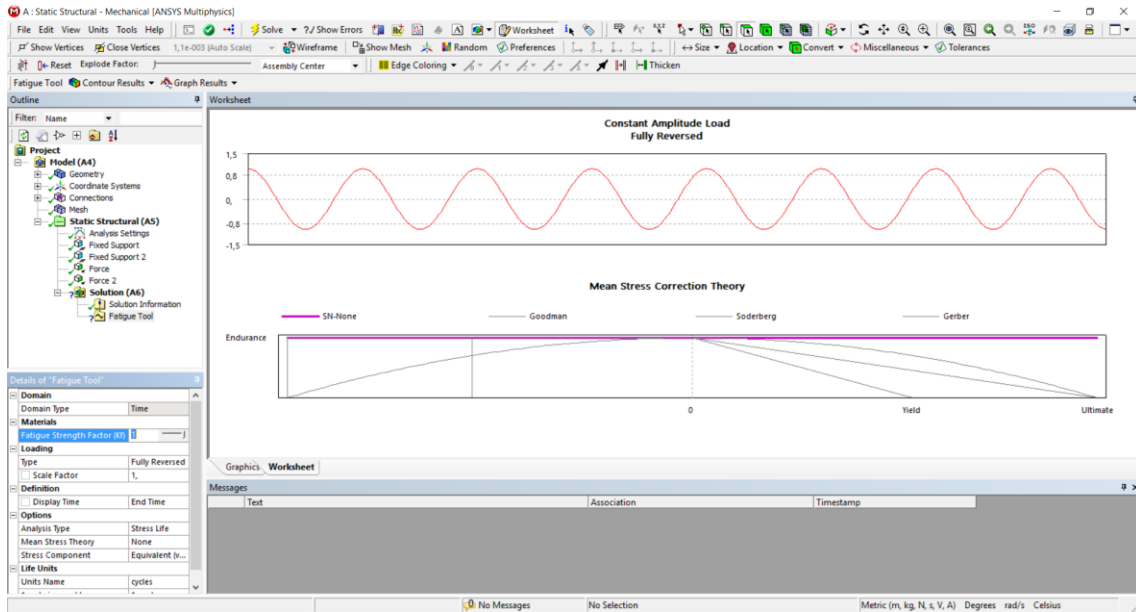


Figura 28. Selección de datos para fatiga.

Resultados

Caracterización de la barra estabilizadora

Análisis Metalográfico.

De la barra estabilizadora se procedió a tomar muestras representativas tanto de la parte recta como de parte curva, las mismas que se muestran en la figura 29.



Figura 29. Muestras de la barra estabilizadora.

Luego de aplicar el procedimiento metalográfico, se observaron las muestras bajo el microscopio y se tomaron fotografías de la microestructura, que son las que se muestran a continuación.



Figura 30. Microestructura de la barra estabilizadora parte recta a 500x atacada con nital 2.

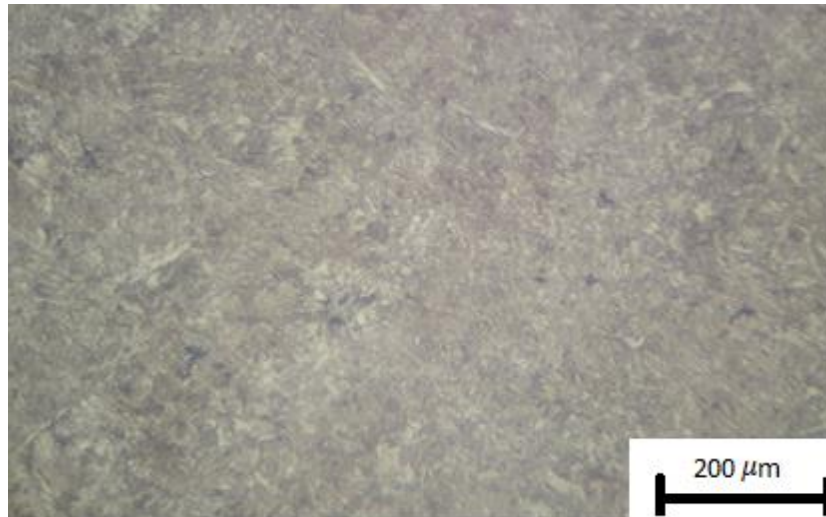


Figura 31. Microestructura de la barra estabilizadora parte curva a 500x, atacada con nital 2.

De las figuras 30 y 31 de la microestructura, se puede determinar que el acero ha sido templado y revenido, Se puede observar la presencia de partículas de carburo de cromo (partículas oscuras) precipitadas en una matriz de ferrita, las zonas mayoritarias de color café corresponden a martensita revenida y las zonas más claras en pequeña cantidad es la martensita retenida que no llegó a transformarse.

Probablemente, el acero fue templado y luego revenido por encima de 425°C (800°F) con la finalidad de la aumentar significativamente la tenacidad a expensas de una disminución en la resistencia mecánica y la dureza. Este tratamiento se efectúa cuando los requerimientos son principalmente de alta tenacidad (elasticidad) y en menor grado de resistencia mecánica y dureza.

Medición de Dureza.

Los resultados obtenidos de la probeta número 1 se los presenta en la tabla 5.

Tabla 5

Medición de dureza probeta 1

Probeta 1	
Medición 1	40 Hrc
Medición 2	40 Hrc
Medición 3	39 Hrc
Promedio	39,66 Hrc

De las mediciones de la probeta 1, se tiene una dureza promedio de 39,66 HRC.

A continuación se puede observar en la tabla 6, las mediciones de la probeta 2.

Tabla 6

Medición de dureza probeta 2.

Probeta 2	
Medición 1	39 Hrc
Medición 2	39 Hrc
Medición 3	40 Hrc
Promedio	39,33 Hrc

De las mediciones de la probeta 2, se tiene una dureza promedio de 39,33 HRC.

Finalmente, se tiene las mediciones de dureza de la probeta 7, que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 7

Medición de dureza probeta 3.

Probeta 3	
Medición 1	39 Hrc
Medición 2	39 Hrc
Medición 3	40 HRC
Promedio	39,33 Hrc

De las mediciones de la probeta 3, se tiene una dureza promedio de 39,33 HRC.

De las tres probetas se determinó un promedio de dureza como se muestra en la tabla 5.

Tabla 8

Promedio de mediciones de dureza.

Promedio Total	
Probeta 1	39,66 Hrc
Probeta 2	39,33 Hrc
Probeta 3	39,33 Hrc
Promedio	39,44 Hrc

Se tiene como promedio total de dureza la barra estabilizadora 39,44 Hrc; de esta dureza se puede deducir que el acero tubo un tratamiento térmico, porque si no lo tuviera la probeta debería tener una dureza inferior.

Espectrometría.

El ensayo espectrométrico fue realizado en el laboratorio de materiales de la ESPOCH en el espectrómetro Q2 ION de la marca Bruker. Los tres disparos que se realizaron sobre las muestras, dieron la siguiente composición promedio:

Tabla 9

Resultados de la espectrometría aplicada al acero de la barra estabilizadora.

Bruker Analysis Report



Sample:					
Analysis Time: 25.05.2017 10:11:58			Method: Fe130		
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Ø	0,672	0,194	0,709	<0,0030	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
Ø	0,787	<0,0100	<0,0100	0,0089	0,045
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	Fe [%]
Ø	<0,0050	<0,0100	0,0035	<0,0030	97,57

Con los resultados obtenidos, se compara la composición química del acero obtenida en este ensayo con diferentes composiciones de diferentes aceros, llegando a que el acero que se tiene es el AISI 5160 ya que tiene una composición similar, a continuación, se presenta una tabla que compara los principales elementos de aleación de la barra estabilizadora y del acero 5160 obtenido en catálogos.

Tabla 10

Comparación de la composición del acero de la barra estabilizadora y el acero 5160

Composición	C	Si	Mn	Cr	P	S
Acero barra estabilizadora	0,672	0,194	0,709	0,787	< 0,0030	< 0,0030
Acero 5160	0,56-0,61	0,15 - 0,35	0,75-1,00	0,70-0,80	0,035 máx.	0,040 máx.

Identificación del Material de la barra estabilizadora y propuestas de materiales alternativos

De los resultados obtenidos en el análisis metalográfico, ensayo de dureza y ensayo espectrométrico, se puede concluir que se trata de un acero de la serie AISI 5160, donde, 51 corresponde a un acero al cromo que tiene hasta un 0,80 % de este elemento y 60 que tiene un contenido de carbono comprendido entre 0,60 y 0,70 %.

Los componentes fabricados de acero AISI 5160 son usados en la suspensión de automóviles.

El tratamiento aplicado para darle las características adecuadas consiste en un austenizado a 850 °C seguido de temple en aceite y revenido 425°C con el fin de mejorar la tenacidad y la elasticidad (catalogo IVAN BOHMAN C.A., ver anexos).

El temple se realiza calentando el material a una cierta temperatura, dependiendo del material, y luego enfriándolo rápidamente. Con el enfriamiento rápido se evita obtener los microconstituyentes de equilibrio perlita y ferrita, y se obtiene la martensita que es una estructura metaestable consistente en una solución sólida sobresaturada de carbono en Fe α .

Como el material templado es duro y frágil, requiere de un tratamiento posterior que es el revenido.

Se entiende por revenido de un acero, el proceso de calentamiento de un acero templado a temperaturas inferiores a las de la temperatura de transformación eutectoide, para así eliminar las tensiones generadas durante la transformación martensíticas y ablandar la estructura devolviendo tenacidad al material.

El revenido tiene como finalidades:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un punto de mínima fragilidad.
- Reducir las tensiones internas de transformación que se originan en el temple.
- Cambiar las características mecánicas en las piezas templadas mejorando la tenacidad y disminuyendo ligeramente la resistencia y dureza

De la figura 32, que se presenta a continuación, se puede determinar que la temperatura de revenido que se debe aplicar, depende de las propiedades que se pretende obtener en el material. Esto es, a mayor temperatura menor dureza y resistencia, pero mayor tenacidad y elasticidad.

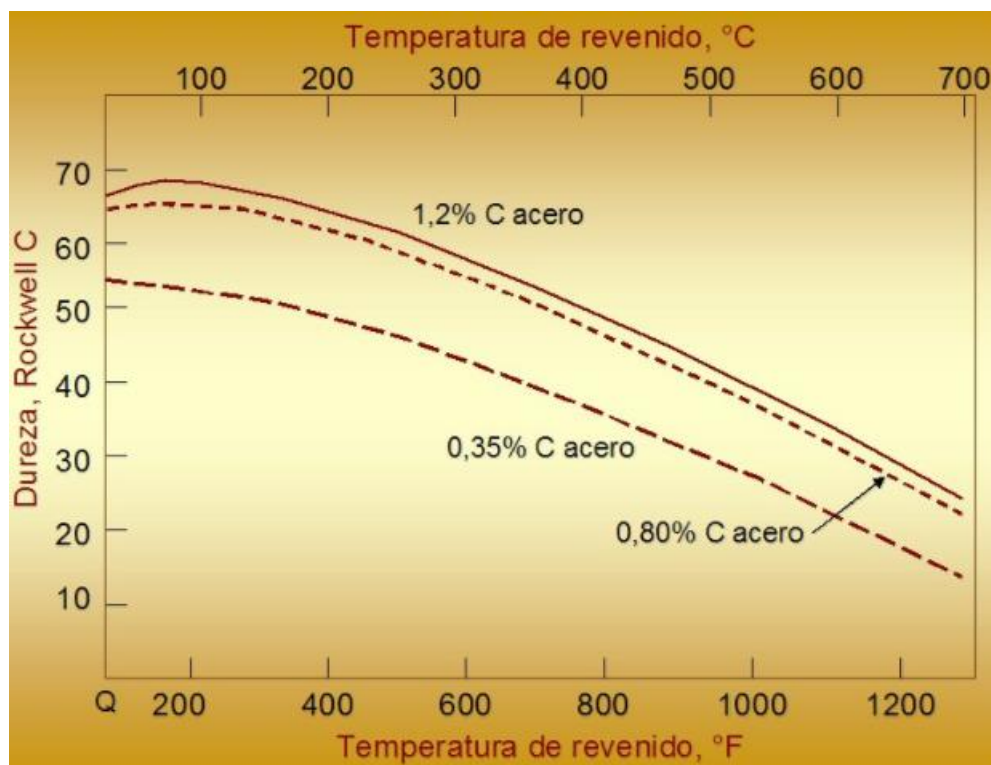


Figura 32. Temperatura de Revenido. Recuperado de: (Valencia U. P., 2017)

Aceros Utilizados en la Industria Automotriz

El acero es el material predominante en la fabricación de los vehículos gracias a sus propiedades mecánicas (resistencia y ductilidad) y también por su bajo coste económico.

Aunque el aluminio como los plásticos ha aumentado los porcentajes en la carrocería, el acero sigue teniendo entre un 70 y 80% de su peso.

Aceros Bohler.

En el país se puede encontrar el acero Bohler V15 (AISI 4340). Acero de especial resistencia a la tracción y torsión. Muy buena resistencia al desgaste y al impacto. Utilizable a temperaturas hasta de 500 °C sin perder su bonificación, se utiliza para partes y repuestos sometidos a muy altos esfuerzos dinámicos como cigüeñales ejes de leva, arboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardan, tuercas de alta tensión, piñones, ruedas dentadas, moldes para inyección de plásticos.

Aceros SKF.

El acero SKF distribuidos por Ivan Bohman C. A., que puede utilizarse para aplicaciones automotrices es el 705 es un acero al molibdeno más cromo y níquel. El molibdeno tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. El ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados para maquinaria. Al combinarse con níquel y cromo soporta altas exigencias de resistencia y tenacidad en secciones grandes. Su contenido de níquel le da más templabilidad, lo mismo que la resistencia en caliente. 705 combina alta resistencia mecánica (la mayor del mercado) con buena tenacidad. Este acero en forma standard es suministrado bonificado, por lo que no se requería luego un tratamiento térmico, sin embargo, si se desea mejores propiedades, puede ser templado al aceite.

Análisis Analítico de la Barra Estabilizadora con Material Original

Cálculo de los esfuerzos a los que está sometida la barra estabilizadora.

El comportamiento de un vehículo al tomar una curva es, como consecuencia del sistema de fuerzas actuantes sobre el mismo, más inestable que cuando se halla circulando por línea recta. Las fuerzas que actúan sobre el vehículo son:

- El peso del vehículo, que es igual a su masa por la gravedad (mg)
- La fuerza centrípeta, provocada por la variación en la dirección del vehículo dentro de la curva circular. La fuerza centrípeta es una fuerza dirigida hacia el centro. Hace que el cuerpo siga una trayectoria circular. Cuando un objeto se mueve a través de una curva, este se acelera ya que la velocidad cambia continuamente su dirección.

$$F = \frac{mV^2}{r}$$

Esta fuerza puede ser obtenida a partir de las leyes de Newton, concretamente por la segunda ley.

La fuerza de rozamiento (R), fuerza pasiva producida por el contacto entre neumático y pavimento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = f \times N$$

Características del Automóvil a analizar.

En la siguiente figura 33 se presenta las dimensiones del auto aveo family 1.5 litros.

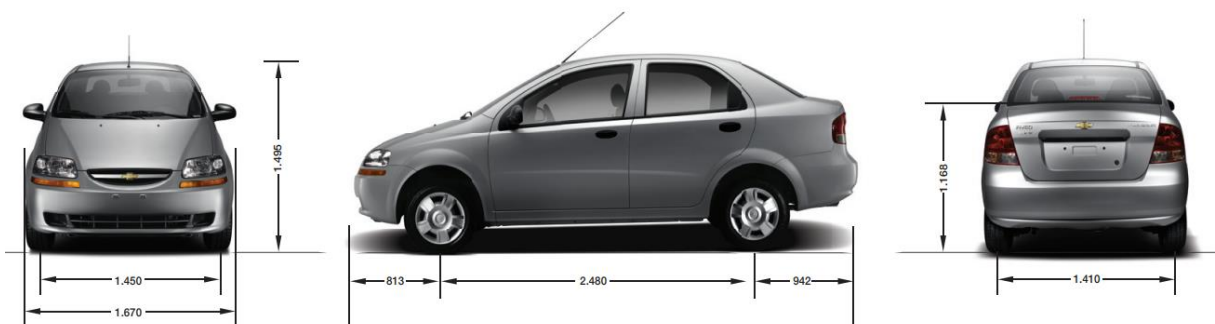


Figura 33. Dimensiones aveo family 1.5 litros. Fuente: General Motors

También podemos observar pesos y capacidades necesarias para el cálculo.

Tabla 11

Pesos y Capacidades Aveo Family 1.5 litros.

PESOS Y CAPACIDADES	1.5 L M/T
Peso vacío (kg)	1.040
Peso bruto vehicular (kg)	1.455
Capacidad de carga (kg)	415
Volumen en área de carga (L)	351
Tanque de combustible (gal./L)	11.88/45
Capacidad de pasajeros	5

Nota:

De la ficha técnica, se determina que el Chevrolet Aveo Family 1.5 L, tiene una capacidad de carga de 415 kg, más el peso bruto vehicular 1455 kg, da un total de 1870 Kg.

Velocidad máxima en una curva peraltada.

En la figura 34 se puede observar la relación de peralte, velocidad y radio de curvatura; con los datos de relación de peralte y velocidad se puede encontrar en radio de curvatura.

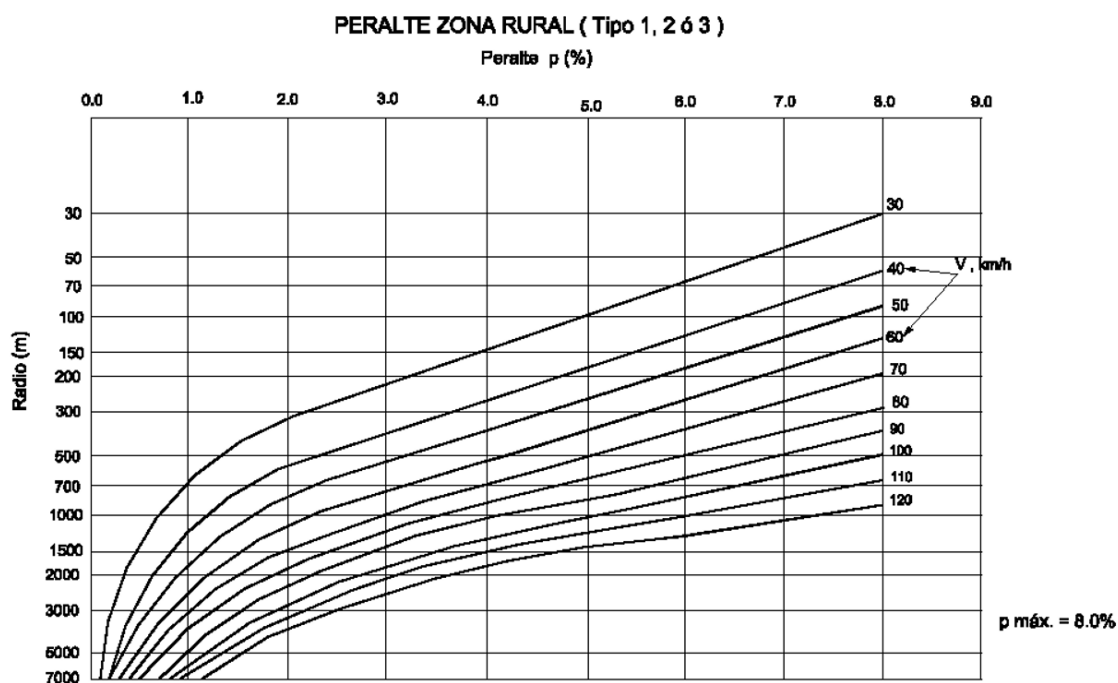


Figura 34. Relación de peralte, radio de curvatura y velocidad.

Asumiendo que por ser un carro liviano se desplaza a velocidades promedio de 100 Km/h, el peralte máximo en una curva es de 8,0 % (4,57 °) y un radio mínimo de curvatura de 500 m.

Jones y Childers, recomiendan un coeficiente de fricción de 0,7 para calzada seca y de 0,4 para calzada mojada.

La velocidad máxima con la que puede tomar una curva un auto sin patinar, viene dada por la siguiente ecuación

$$v_{\max} = \sqrt{g r \frac{u + tg \alpha}{1 - u tg \alpha}}$$

Para calzada seca, aproximadamente 60 km/h (16,67 m/s)

$$v_{\max} = \sqrt{(9,8)(500) \frac{0,7 + TN 4,57}{1 - 0,7 TN 4,57}} = 63,62 \text{ km / h}$$

Para calzada húmeda

$$v_{\max} = \sqrt{(9,8)(500) \frac{0,4 + TN 4,57}{1 - 0,4 TN 4,57}} = 31,17 \text{ km / h}$$

Calculo de reacciones de la barra estabilizadora.

En la siguiente figura se puede observar las cargas a las que está sometida la barra estabilizadora

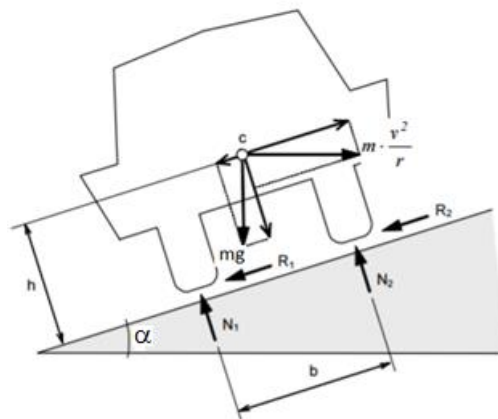


Figura 35. Cargas de barra estabilizadora. Recuperado de: (Jover, 2017)

Representando estas fuerzas en un diagrama de cuerpo libre se tiene:

$$\Sigma F_H = 0$$

$$\frac{mV^2}{r} \cos \alpha - mg \operatorname{sen} \alpha - R_1 - R_2 = 0$$

$$\frac{(1870\text{kg})(16,67\text{ m/s})^2}{500\text{m}} \cos 4,57^\circ - (1870\text{kg})(9,8\text{ m/s}^2) \text{sen} 4,57^\circ - R_1 - R_2 = 0$$

$$R_1 + R_2 = -420,85\text{ N}$$

Entonces la fuerza centrípeta es de 420,85 N.

$$\Sigma F_v = 0$$

$$mg \cos \alpha + \frac{mV^2}{r} \text{sen} \alpha - mg \text{sen} \alpha - N_1 - N_2 = 0$$

$$(1870\text{ kg})(9,8\text{ m/s}^2) \cos 4,57^\circ + \frac{(1870\text{ kg})(16,67\text{ m/s})^2}{500\text{ m}} \text{sen} 4,57^\circ - (1870\text{ kg})(9,8\text{ m/s}^2) \text{sen} 4,57^\circ - N_1 - N_2 = 0$$

$$N_1 + N_2 = 16890,38\text{ N}$$

Aplicando sumatoria de momento en N₂ se tiene:

$$\Sigma M = 0$$

$$mg \text{sen} \alpha \left(\frac{b}{2}\right) + mg \cos \alpha \left(\frac{b}{2}\right) + \frac{mV^2}{r} \text{sen} \alpha \left(\frac{b}{2}\right) - \frac{mV^2}{r} \cos \alpha \left(\frac{b}{2}\right) - N_1 (b) = 0$$

$$(1870\text{kg})(9,8\text{ m/s}^2) \text{sen} 4,57^\circ \left(\frac{1,45}{2}\right) + (1870\text{kg})(9,8\text{ m/s}^2) \cos 4,57^\circ \left(\frac{1,45}{2}\right) + \frac{(1870\text{kg})(16,67\text{ m/s})^2}{500\text{m}} \text{sen} 4,57^\circ \left(\frac{1,45}{2}\right) - \frac{(1870\text{kg})(16,67\text{ m/s})^2}{500\text{m}} \cos 4,57^\circ \left(\frac{1,45}{2}\right) - N_1 (1,45) = 0$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, se tiene:

$$N_1 = 9387,35\text{ N}$$

$$N_2 = 7503,03\text{ N}$$

$$N_1 - N_2 = 1884,32\text{ N}$$

En cada extremo de la barra actúa una carga de 942,16 N. Se divide para dos porque en la parte trasera del auto existe otra barra estabilizadora que comparte la misma carga.

En una curva no peraltada, se produciría el deslizamiento hacia el exterior con las consecuencias que se pueden prever.

Resultados Obtenidos de la Simulación de la Barra Estabilizadora y materiales alternativos propuestos.

Determinación del mallado a utilizar en la simulación.

Para determinar el tamaño de malla que se va utilizar, se realiza una curva de convergencia factor de seguridad vs tamaño de malla, hasta observar cuando la curva se estabilice el punto donde se estabilice la curva nos dará el factor de seguridad real con el tamaño de malla correcto.

Se va a trabajar con el análisis estático de la barra estabilizadora acero AISI 5160 para determinar el tamaño de malla que se utilizara durante el proceso de simulación.

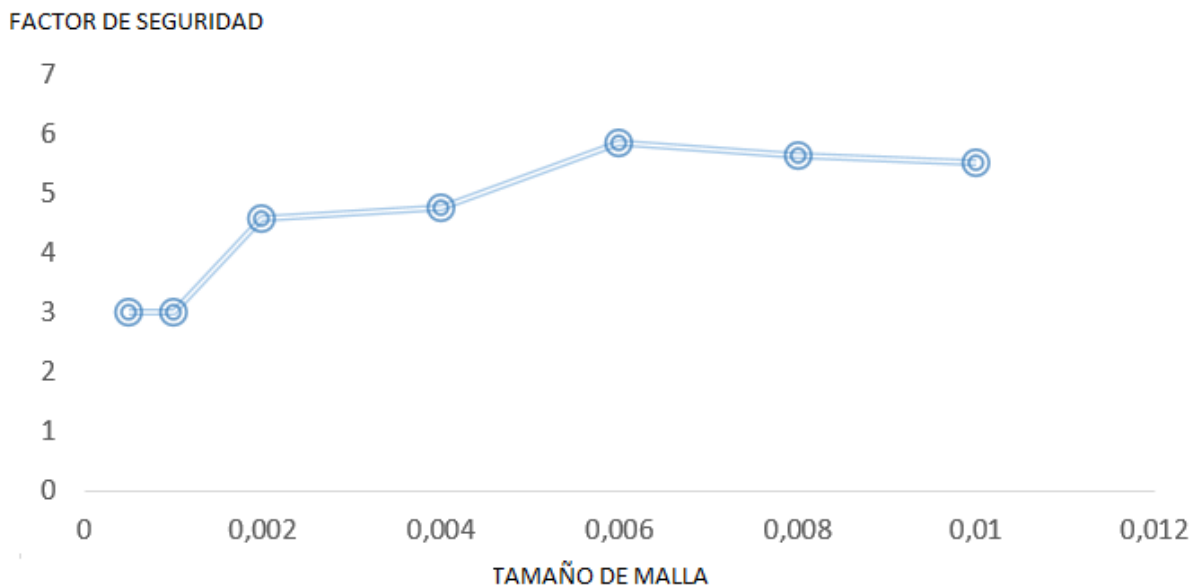


Figura 36 Curva de Convergencia.

En la figura 36 se puede observar la curva de convergencia utilizada para determinar el tamaño de malla, en esta curva se puede observar que cuando el tamaño de la malla es de 0,001 el resultado se estabiliza, por lo tanto se va utilizar este tamaño de malla para la simulación en el

software tanto estáticamente como a fatiga de la barra estabilizadora con las diferentes opciones de materiales.

AISI 5160 Simulación Estática.

En la figura 37 que se presenta a continuación se puede observar el análisis estático de la barra estabilizadora con el material AISI 5160, que es el material original.

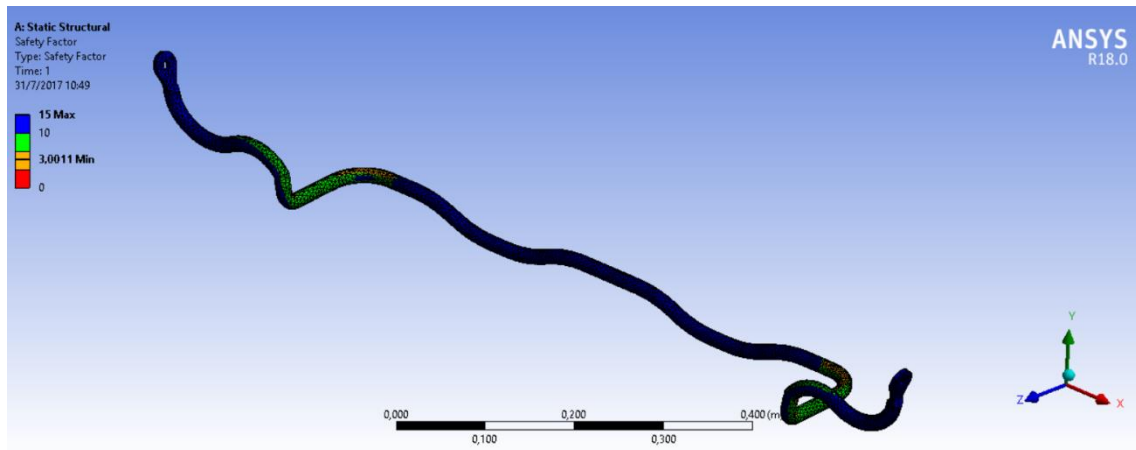


Figura 37. Análisis estático acero AISI 5160.

Del análisis estático se obtiene un factor de seguridad mínimo de 3,0011 y un factor de seguridad máximo de 15.

AISI 5160 Simulación a Fatiga.

En la figura 38 que se presenta a continuación se puede observar el análisis a fatiga de la barra estabilizadora con el material AISI 5160, que es el material original.

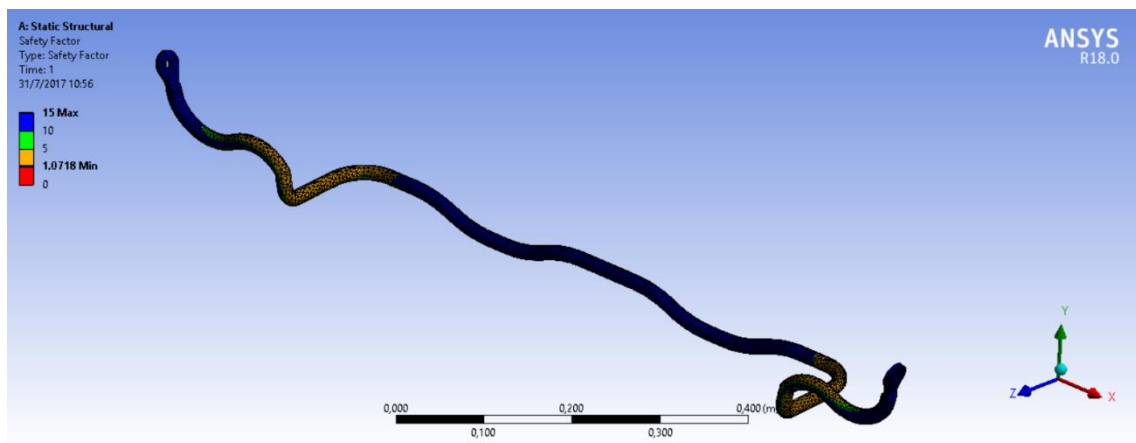


Figura 38. Análisis a fatiga acero AISI 5160.

Del análisis a fatiga se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1,0718 y un factor de seguridad máximo de 15.

AISI 4337 Simulación Estática.

En la figura 39 que se presenta a continuación se puede observar el análisis estático de la barra estabilizadora con el material AISI 4337, que es un posible material alterno.

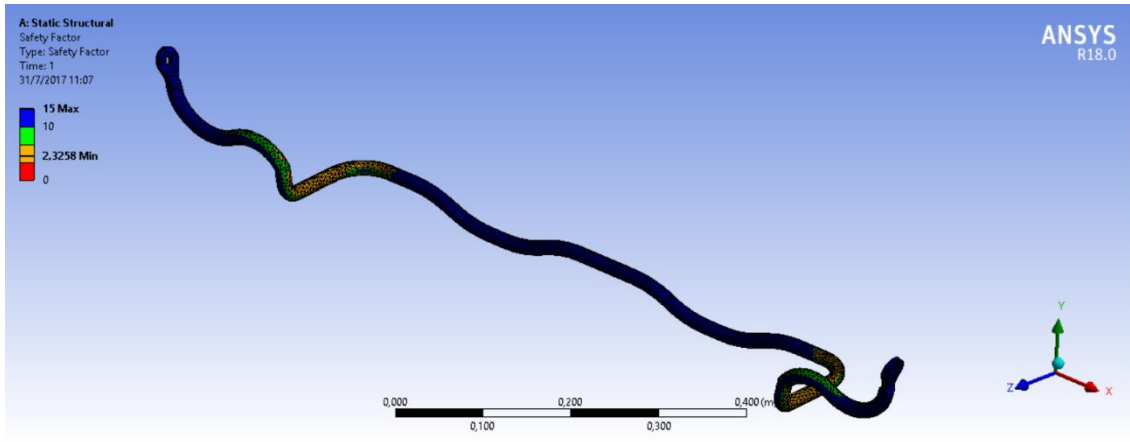


Figura 39. Análisis estático acero AISI 4337.

Del análisis estático se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2,3258 y un factor de seguridad máximo de 15.

AISI 4337 Simulación a Fatiga.

En la figura 40 que se presenta a continuación se puede observar el análisis a fatiga de la barra estabilizadora con el material AISI 4337, que es un posible material alterno.

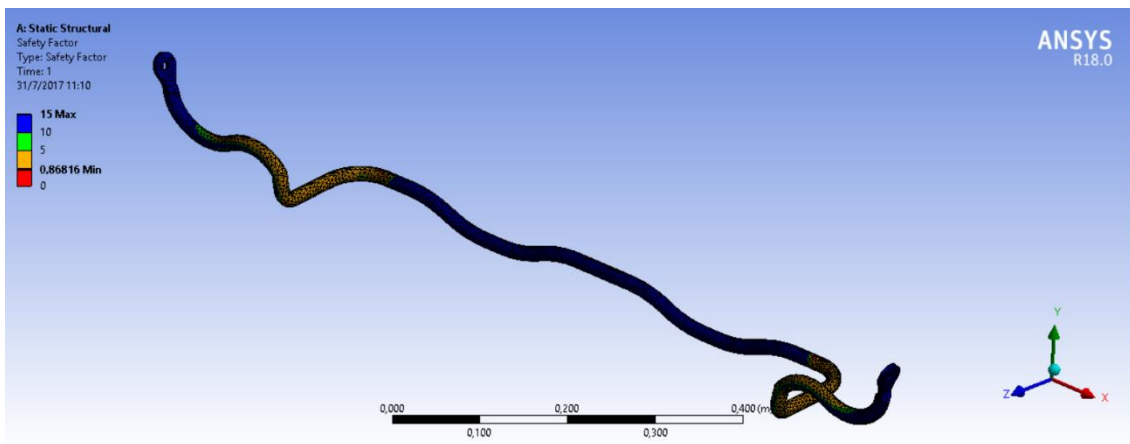


Figura 40. Análisis a fatiga AISI 4337.

Del análisis a fatiga se obtiene un factor de seguridad mínimo de 0,86816 y un factor de seguridad máximo de 15.

AISI 4340 Simulación Estática.

En la figura 41 que se presenta a continuación se puede observar el análisis estático de la barra estabilizadora con el material AISI 4340, que es un posible material alterno.

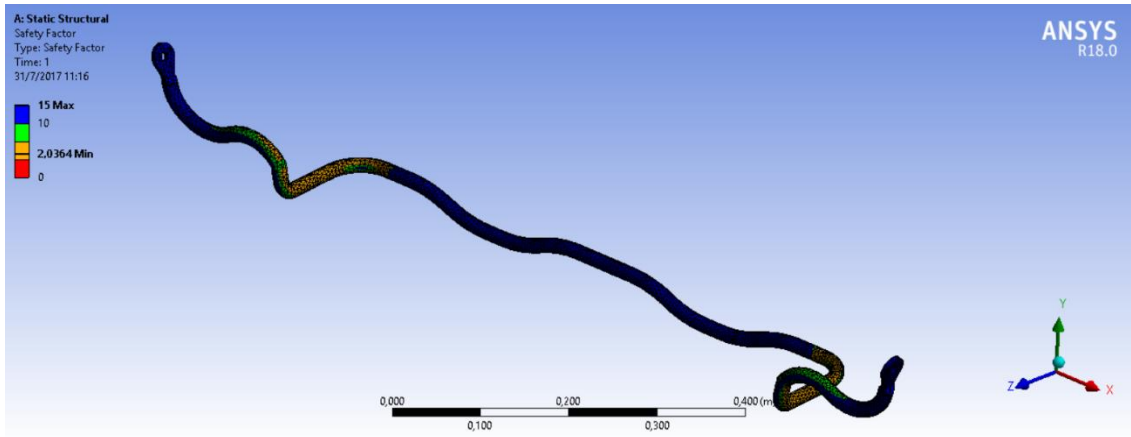


Figura 41. Análisis estático AISI 4340.

Del análisis estático se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2,0364 y un factor de seguridad máximo de 15.

AISI 4340 Simulación a Fatiga.

En la figura 42 que se presenta a continuación se puede observar el análisis a fatiga de la barra estabilizadora con el material AISI 4340, que es un posible material alterno.

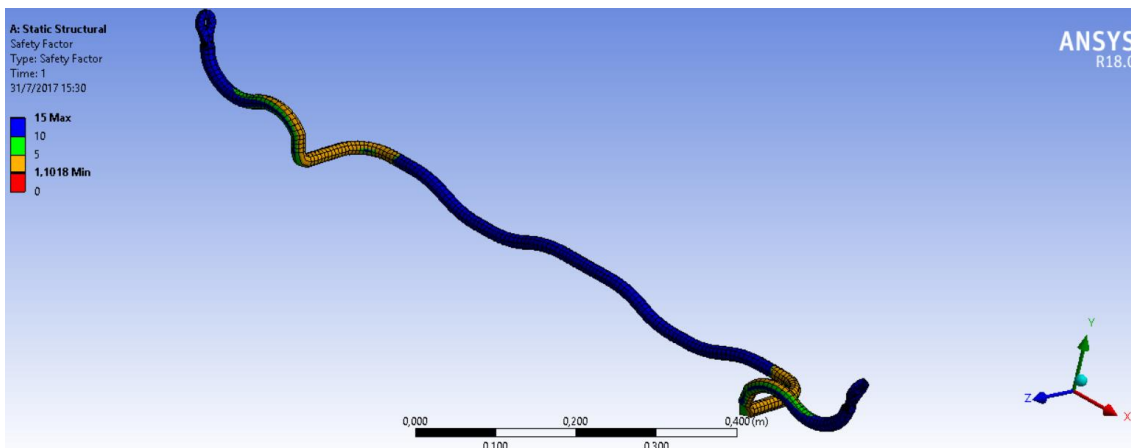


Figura 42. Análisis a Fatiga AISI 4340

Del análisis a fatiga se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1,1018 y un factor de seguridad máximo de 15.

Validación de resultados obtenidos de la Simulación Estática y a Fatiga de la Barra Estabilizadora.

AISI 5160 Análisis Estático.

Para una barra redonda en torsión, los esfuerzos son proporcionales al radio ρ (Budynas, 2012).

$$\tau = \frac{T \rho}{J}$$

Donde T = par de torsión

J = segundo momento polar del área

Si se designa a r como el radio de la superficie exterior, se tiene

$$\tau_{\max} = \frac{T r}{J}$$

Para una sección circular solida

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$\tau_{\max} = \frac{T \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16F r}{\pi d^3}$$

El brazo de torsión es aproximadamente de 0,20 m

$$\tau_{xy} = \frac{16(942,16 N)(0,20 m)}{\pi (0,018 m)^3} = 164553548,6 N / m^2 = 164,55 MPa$$

Según la teoría de la energía de distorsión, se tiene que

$$\sigma' = \left(\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)^{1/2} = \left[(0)^2 + 3(164,55)^2 \right]^{1/2} = 285,00 MPa$$

Se prueba con un acero AISI 5160 normalizado, $S_{ut} = 1670 \text{ MPa}$ (Budynas, 2012)

Para el análisis estático se tiene que ($S_y \approx 0,5 S_{ut}$)

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{835}{285,0} = 2,9$$

Estáticamente este material cumple el requerimiento de carga

AISI 5160 Análisis a Fatiga

La barra estabilizadora está sometida a esfuerzos que se repiten en cada curva, por lo tanto, justifica el cálculo de fatiga

Para el análisis dinámico se tiene (Budynas, 2012):

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Para un $S_{ut} \leq a \text{ 1400 MPa}$.

$$S'_e = 0,5 S_{ut} = 0,5(1147,38 \text{ MPa}) = 573,69 \text{ MPa}$$

Factor de superficie k_a

$$k_a = a S_{ut}^b$$

De la tabla (Anexo J) correspondiente para maquinado se tiene $a = 4,51$ y $b = -0,265$

$$k_a = (4,51)(1147,38)^{-0,265} = 0,697$$

El factor de tamaño k_b (Anexo J).

$$k_b = 1,24 d^{-0,107} \quad \text{para un rango de } 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$k_b = 1,24(18)^{-0,107} = 0,91$$

El factor de carga k_c (Budynas, 2012),

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Para torsión $K_c = 0,59$

El factor de temperatura k_d

El elemento funciona a temperatura ambiente, porque el tiempo que actúa la fuerza centrípeta no es suficiente para que produzca su calentamiento, por lo que

$K_d = 1$.

El factor de confiabilidad K_e (Budynas, 2012)

Tabla 12

Factor de Confiabilidad

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Si la barra tiene una confiabilidad del 90 %, el factor de confiabilidad $K_e = 0,897$

Por lo tanto, reemplazando todos estos factores, se tiene que el límite de resistencia a la fatiga S_e es:

$$S_e = (0,697)(0,91)(0,59)(1)(0,897) (573,69) = 192,573 MPa$$

Ecuación de Goodman modificada (Budynas, 2012)

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Se determinan los esfuerzos máximos y mínimos, en este caso son esfuerzos repetidos, que aparecen solamente cuando el vehículo toma una curva. De la figura se deduce que $\sigma_a = \sigma_m$ y que $\sigma_{\min} = 0$. A continuación se puede observar la gráfica de un esfuerzo repetido como el que se tiene en la barra estabilizadora.

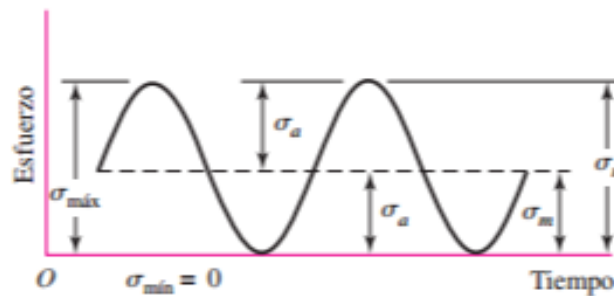


Figura 43. Gráfica de un esfuerzo repetido. Recuperado de: (Budynas, 2012)

$$\sigma_{\max} = 2 \sigma_a = 2 \sigma_m = 297,20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{285,00 + 0}{2} = 142,5 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} = \frac{1}{\frac{142,5}{192,573} + \frac{142,5}{1147,38}} = 1,157$$

Lo que quiere decir que el acero AISI 5160 del cual está construida la barra estabilizadora del Chevrolet Aveo Family es adecuado para esta aplicación.

Análisis Analítico de la Barra Estabilizadora con Materiales Alternativos

AISI 4140 Análisis Estático.

Para los aceros AISI 4337 o 4140, el $S_y = 685 \text{ MPa}$ y el $S_{ut} = 90 \text{ kg/mm}^2 = 882,6 \text{ MPa}$.

Para el análisis estático se tiene que

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{685}{285,00} = 2,403$$

Estáticamente estos materiales cumplen el requerimiento

AISI 4337 Análisis a Fatiga.

Para el análisis dinámico se tiene

$$S'_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Para un $S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$.

$$S'_e = 0,5 S_{ut} = 0,5(882,6 \text{ MPa}) = 441,3 \text{ MPa}$$

Factor de superficie k_a

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Para $S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi} (1400 \text{ MPa})$ $S'_e = 0,5 S_{ut}$

De la tabla correspondiente para maquinado se tiene $a = 4,51$ y $b = -0,265$

$$k_a = (4,51)(882,6)^{-0,265} = 0,747$$

El factor de tamaño k_b

$$k_b = 1,24 d^{-0,107} \quad \text{para un rango de } 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$k_b = 1,24(18)^{-0,107} = 0,91$$

El factor de carga k_c

Para torsión $K_c = 0,59$

Para flexión $K_c = 1$

El factor de temperatura k_d

El elemento funciona a temperatura ambiente, porque el tiempo que actúa la fuerza centrípeta no es suficiente para que produzca su calentamiento, por lo que

$$K_d = 1$$

El factor de confiabilidad K_e

Si la barra tiene una confiabilidad del 90 %, el factor de confiabilidad $K_e = 0,897$

Por lo tanto, reemplazando todos estos factores, se tiene que el límite de resistencia a la fatiga

S_e es

$$S_e = (0,747)(0,91)(0,59)(1)(0,897)(441,3) = 158,76 \text{ MPa}$$

Ecuación de Goodman modificada

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Por la misma consideración anterior, se tiene que

$$\sigma_{\max} = 2 \sigma_a = 2 \sigma_m = 297,20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = 0$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{285,00 + 0}{2} = 142,5 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} = \frac{1}{\frac{142,50}{158,76} + \frac{142,50}{882,6}} = 0,944$$

AISI 4340 Análisis Estático.

Ahora se va a trabajar con un acero alternativo que es AISI 4340 templado y revenido a 425 °C y que se recomienda para la fabricación de partes automotrices de la suspensión, $S_{ut} = 1240$ MPa (Shigley novena edición, tabla A-23)

Para el análisis estático se tiene que ($S_y \approx 0,5 S_{ut}$)

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{620}{285,00} = 2,17$$

Estáticamente este material cumple el requerimiento de carga

AISI 4340 Análisis a Fatiga.

Para un $S_{ut} \leq 1400$ MPa.

$$S'_e = 0,5 S_{ut} = 0,5(1240 \text{ MPa}) = 620 \text{ MPa}$$

Factor de superficie k_a

$$k_a = a S_{ut}^b$$

De la tabla correspondiente para maquinado se tiene $a = 4,51$ y $b = -0,265$

$$k_a = (4,51)(1240)^{-0,265} = 0,683$$

El factor de tamaño k_b

$$k_b = 1,24 d^{-0,107} \quad \text{para un rango de } 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$k_b = 1,24(18)^{-0,107} = 0,91$$

El factor de carga k_c

Para torsión $K_c = 0,59$

Para flexión $K_c = 1$

El factor de temperatura k_d

El elemento funciona a temperatura ambiente, porque el tiempo que actúa la fuerza centrípeta no es suficiente para que produzca su calentamiento, por lo que

$$K_d = 1$$

El factor de confiabilidad K_e

Si la barra tiene una confiabilidad del 90 %, el factor de confiabilidad $K_e = 0,897$

Por lo tanto, reemplazando todos estos factores, se tiene que el límite de resistencia a la fatiga

S_e es

$$S_e = (0,683)(0,91)(0,59)(1)(0,897) (620) = 203,938 MPa$$

Ecuación de Goodman modificada

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Por la misma consideración anterior, se tiene que

$$\sigma_{max} = 2 \sigma_a = 2 \sigma_m = 297,20 MPa$$

$$\sigma_{min} = 0$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{285,00 + 0}{2} = 142,5 MPa$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} = \frac{1}{\frac{142,5}{203,938} + \frac{142,5}{1240}} = 1,230$$

De este proceso de cálculo se determina que la barra estabilizadora con el acero AISI 4340 sería ligeramente más segura que la construida por el acero AISI 5160, el mercado más cercano para obtener este acero es Colombia. El acero AISI 4340 en cambio, se lo puede adquirir en el país tanto en la empresa Bohler como en Ivan Bohman, por lo que con toda seguridad se abarata su costo.

A continuación se presenta la tabla 13 en la que recogen los resultados del análisis estático y a fatiga, tanto en el software como analíticamente del material original y de las opciones de material alterno.

Tabla 13

Tabla de resultados análisis estático y a fatiga

Resultados		Software	% Error	Método Analítico
AISI 5160	Análisis Estático	3,011	3,827586207	2,9
	Análisis Fatiga	1,0718	7,363872083	1,157
AISI 4140	Análisis Estático	2,3258	3,212650853	2,403
	Análisis Fatiga	0,86816	8,033898305	0,944
AISI 4340	Análisis Estático	2,0364	6,156682028	2,17
	Análisis Fatiga	1,1018	10,42276423	1,23

Del análisis de la tabla 13, se puede ver que la modelación en el software ANSYS proporciona resultados bastante cercanos a los obtenidos manualmente por el método analítico, teniéndose como error mínimo en la simulación 3,2 % y un error máximo del 10,4 %.

Por otra parte, los coeficientes de seguridad estáticos son muchos mayores que los dinámicos, por cuanto los esfuerzos fluctuantes involucran una mayor cantidad de factores que afectan la vida de los elementos en funcionamiento.

En cuanto a los materiales alternos, se puede verificar que el acero 4340, es el que mejor se adapta a la fabricación de las barras estabilizadoras, a pesar de un factor de seguridad estático menor que del acero 5160, pero con un factor de seguridad de fatiga ligeramente mayor.

El acero 4140, presenta un factor de seguridad estático mayor que el 4340, pero con un factor de seguridad de fatiga menor, motivo por el cual no se recomienda su utilización para esta aplicación.

Revisando catálogos de aceros, se pueden encontrar muchos otros materiales alternos, pero el interés de esta investigación era probar con materiales que se encuentran disponibles en el mercado nacional.

Selección de Material Alterno

Como se puede observar en el cálculo se propone dos materiales alternativos que se puede encontrar en el mercado nacional el AISI 4140 y el AISI 4340, el AISI 4140 tiene un factor de seguridad estático de 2,403 y un factor de seguridad a fatiga de 0,944, por otra parte, el acero AISI 4340 tiene un factor de seguridad estático de 2,17 y un factor de seguridad a fatiga de 1,23.

Tabla 14

Acero AISI 4340 propiedades.

ACERO BOHLER AISI 4340	
Estado de Entrega:	Bonificada 1000 N/mm ² (300 HB)
Dureza en Estado de Entrega:	95 – 115 Kg/mm ² liberado de tensiones
Resistencia a la tracción:	85-115 Kg/mm ²
Límite de fluencia:	65 – 75 Kg/mm ²
Medias disponibles:	Redondos 5/8" (15,8 mm) y 22" Platinas 255 x 26 – 700 x 500 mm

De la discusión del acápite anterior (tabla 10), se propone como alternativa la utilización del acero de baja aleación al cromo AISI 4340, que presenta características mecánicas parecidas a las del AISI 5160 y es mucho más fácil su adquisición porque existe en el mercado nacional, por ser de menor contenido de carbono es menos frágil y al tratarlo térmicamente existe menos riesgo de descarburación (pérdida de carbono). A continuación se puede observar la microestructura de acero AISI 4340 a 500x.

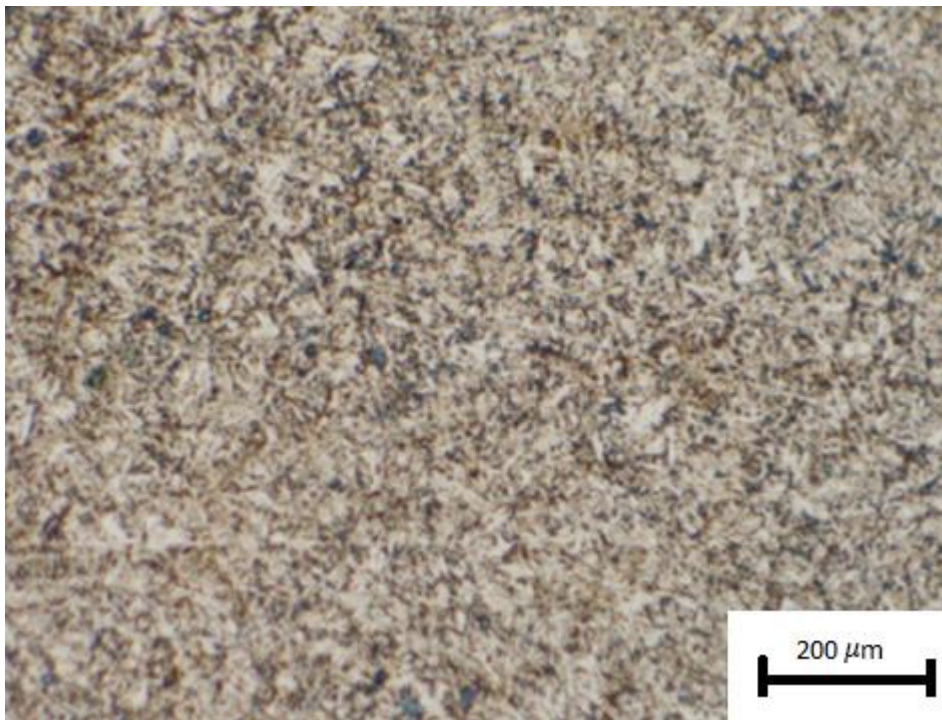


Figura 44. Microestructura del acero 4340 a 500x. Recuperado de: (García, 2011)

En la microestructura del 4340, se puede ver la presencia carburos de cromo en menor cantidad que en el 5160 por el contenido menor de carbono, de martensita revenida y martensita retenida. En el Acero 4340, que es un acero al molibdeno más cromo y níquel. El molibdeno tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. Ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados para maquinaria.

De la figura 45, se deduce claramente que, si se quiere obtener en la barra estabilizadora una dureza de 40 Hrc, se debe aplicar un revenido a 425 °C aproximadamente, con lo cual se garantiza alta resistencia y buena tenacidad características deseadas en la barra estabilizadora.

Luego de finalizada la investigación, se ha podido establecer el siguiente procedimiento que sería aplicable a la necesidad de cualquier elemento automotriz:

1. Establecer la geometría de las piezas
2. Caracterizar el material de las mismas
3. Modelar en un software aplicando los esfuerzos a los que está sometido el elemento en funcionamiento.
4. Realizar la validación del modelo.

Conclusiones:

- Se ha determinado un material alternativo para la fabricación de la barra estabilizadora del Chevrolet Aveo Family con la ayuda de la prueba de dureza, microscopia, espectrometría y simulación llegando a determinar que el acero 4340 puede cumplir con las exigencia requeridas por la barra estabilizadora, además de esto, se selecciona este material, porque se lo puede conseguir fácilmente en el país en dos empresas distribuidoras nacionales IVAN BHMAN C. A. y BOHLER.
- Mediante un análisis manual, se ha determinado que la barra soporta una fuerza de 942,16 N en cada extremo cuando está en funcionamiento y se concluye que cumple una función muy importante de gran responsabilidad en la estabilidad de los autos cuando toman una curva.
- Ayudados de procedimientos normados, se ha realizado la caracterización del material de la barra estabilizadora para identificar su composición y tratamientos aplicados en el actual acero utilizado, por la General Motors para fabricar la barra, para lo cual se cortaron probetas de la misma de zonas representativas, se le aplico el procedimiento metalográfico, la medición de dureza y la determinación de su composición química en un espectrómetro óptico, aproximándose su composición a un acero AISI 5160. Por su microestructura presencia de martensita revenida y dureza 39,66 Hrc, se determinó que estaba templado y revenido.
- Se ha modelado la barra estabilizadora en el software ANSYS, del cual, se ha podido encontrar los factores de seguridad tanto en el estudio estático como a fatiga, mismos que se aproximan bastante a los calculados manualmente en un 90%.
- Se podido validar los datos obtenidos mediante simulación, realizando un análisis comparativo con los resultados obtenidos mediante el cálculo manual, utilizando las teorías del diseño mecánico.
- Se ha establecido un procedimiento, que podría seguir cualquier empresa interesada en fabricar cualquier auto parte de este auto u de otro, según su requerimiento, se ha llegado al mismo tomando en consideración normas y especificaciones internacionales como las ASTM.

- Los equipos del laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería mecánica de la ESPOCH, utilizados en esta investigación son equipos en su mayoría de última tecnología. El durómetro, el espectrómetro y el microscopio electrónico (SEM) fueron adquiridos en los últimos años, para brindar el soporte necesario tanto al proceso de enseñanza como a la investigación.

- Se ha establecido que la producción es la barra estabilizadora es viable si se tendría una demanda mensual de 715 unidades (Anexo I).

Recomendaciones:

- En una próxima investigación se podría variar el diámetro de la barra para encontrar un diámetro óptimo, que permita garantizar estabilidad y seguridad, con la ayuda de esta investigación.

- Se podría realizar un estudio similar con un material no ferroso como el aluminio con el fin de disminuir su peso y tener un vehículo más eficiente.

- Realizar estudios similares con otros tipos de piezas automotrices siguiendo el procedimiento establecido en esta investigación.

- Fabricar barras estabilizadoras del acero 4340, recomendado en esta investigación, para obtener resultados reales.

- Como complemento a esta investigación se podría hacer un estudio para determinar la demanda nacional de barras estabilizadoras, si la demanda es superior a las 715 unidades se fabricaría la barra estabilizadora con utilidad, caso contrario se debería buscar mercado en países de la región para poder superar este número como demanda y así poder tener utilidad.

Referencias

- Allauca, F. (2011). Influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en varillas de acero. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- ASTM Committe. (2015). ASTM E18. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. USA.
- ASTM Committee. (2001). ASTM E3. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. USA: 3 th Edition.
- ASTM Committee. (2015). ASTM E415. *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low - Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. USA: 3 th Edition.
- Beltrán, M. (2015). Inyección. *Tecnología de polimeros*. España: Universidad de Alicante.
- Bledzki, A. K. (2014). Comportamientos recientes y aplicaciones de polímeros rellenos de fibra natural . Suecia: West Pomeranian University of Technology.
- Budynas, R. G. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F., México: Mc Graw Hill.
- Chávez Santibáñez, A., & Martínez Mira , S. (2013). Estudio del acero mediante el método de elementos finitos de la barra estabilizadora.
- FierrosClasicos.com. (2015). *Que es la barra estabilizadora y como funciona*.
- Fundación, F. (Agosto de 2013). Los peligros de la carretera. Portugal.
- García, E. (2011). Temples y medios de enfriamiento. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Industriales, L. d. (2015). Metalografía. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Ingeniería, F. d. (2015). Preparación de probetas y observación al microscopio. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Inversiones, D. d. (2013). Analisis del sector automotriz.

- Jover, R. T. (2017). La estabilidad del vehiculo en las curvas. España: Universidad de Alicante.
- Marcial, A. (2012). Análisis mediante elementos finitos del sistema de suspensión de un automovil liviano. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Metals, A. S. (2004). Metallography and Microstructures. Estados Unidos.
- Monsalve. (Enero de 2011). Caracterización de aceros dual-phase obtenidos por laminación en caliente. Madrid, España.
- Montes de la Torre, R. (2013). Análisis mediante el método de elementos finitos de la barra estabilizadora de un camión.
- Occidental, C. O. (2017). Sistema de Suspensión de los vehículos. Sevilla, España: ingemecánica.
- Ornelas, F. G. (Junio de 2013). Análisis de Aceros por Microscopia Optica. Mexico, Mexico: Instituto Politécnico Nacional.
- Oviedo, U. d. (2017). Moldeo por inyección. España.
- Paula Pérez Fernández, M. J. (2013). Definición y mejora del proceso productivo de una barra estabilizadora YA-24. Pamplona, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- Phys, A. J. (1999). Role of the centrifugal force in vehicle roll. United States of America: American Journal of Physics.
- Valencia, U. P. (2017). Curso de Fundamento de Ciencia de Materiales. Valencia , España.
- Valencia, U. P. (2017). Revenido de los Aceros. Valencia, España.
- Web2feel. (Marzo de 2014). Reconocimiento de Aceros, Ensayo de Espectrometría. Colombia: Mecánica.

Simbología

N_1	[N]	Reacción que ejerce la carretera sobre las ruedas del vehículo
N_2	[N]	Reacción que ejerce la carretera sobre las ruedas del vehículo
F_1	[N]	Fuerza de rozamiento que se opone al deslizamiento del vehículo
F_2	[N]	Fuerza de rozamiento que se opone al deslizamiento del vehículo
m	[Kg]	Masa del vehículo
g	[m/s ²]	Gravedad
F_c	[N]	Fuerza de centrifuga
b	[m]	Distancia entre ruedas
Y_c	[m]	Distancia desde un punto cualquiera al centro de gravedad en el eje y
X_c	[m]	Distancia desde un punto cualquiera al centro de gravedad en el eje x
V	[m/s]	Velocidad del vehículo
μ		Coefficiente de rozamiento
T_{max}	[N/mm]	Tensión Máxima de Torsión
T	[N.mm]	Par de Torsión
J	[mm ⁴]	Momento Polar de Inercia.
σ'	[N/mm ²]	Esfuerzo de Von Mises
σ_x	[N/mm ²]	Esfuerzo Normal en el eje x
σ_y	[N/mm ²]	Esfuerzo Normal en el eje y
τ_{xy}	[N/mm ²]	Tensión de corte en el plano xy
S_y	[N/mm ²]	Limite de Fluencia del Material
n		Factor de Seguridad
σ_a	[N/mm ²]	Componente de Amplitud
σ_y	[N/mm ²]	Componente de Esfuerzo Medio

S_e	$[N/mm^2]$	Limite de fatiga
S_{ut}	$[N/mm^2]$	Limite de tracción
K_a		Factor de superficie
K_b		Factor de tamaño
K_c		Factor de carga
K_d		Factor de temperatura
K_e		Factor de confiabilidad

Anexo A

Microstructural etchants for tool steels

Etchant	Comments
1–10 mL HNO ₃ and 99–90 mL alcohol	Nital. Most commonly used etchant. Do not store solutions with more than 3% HNO ₃ in ethanol. Reveals ferrite grain boundaries and ferrite-carbide interfaces in annealed sample. Preferred etchant for martensite. Reveals prior-austenite grain boundaries in as-quenched and lightly tempered high-alloy tool steels. 2–3% nital most common; 5–10% nital used for high-alloy grades. Use by immersion.
4 g picric acid and 100 mL ethanol	Picral. Recommended for annealed structures or those containing pearlite or bainite. Does not reveal ferrite grain boundaries in annealed specimens. Etching response improved by adding 10–20 drops zephiran chloride. For high-alloy grades, add 1–5 mL HCl to improve etching response. Use by immersion.
1 g picric acid, 5 mL HCl, and 100 mL ethanol	Vilella's reagent. Used in the same manner as picral or picral plus HCl
10 g picric acid and 100 mL ethanol	Superpicral. Must be heated to dissolve picric acid. Use by immersion, up to 1 min or more. A few drops of HCl may be added to increase etch rate.
2 g picric acid, 25 g NaOH, and 100 mL H ₂ O	Alkaline sodium picrate. Immerse sample in boiling solution for 1–15 min or use electrolytically at 6 V dc, 20 °C (68 °F), 30–120 s, stainless steel cathode. Colors cementite and Fe ₄ W ₂ C
10 g K ₃ Fe(CN) ₆ (potassium ferricyanide), 10 g KOH or NaOH, and 100 mL H ₂ O	Murakami's reagent. Use by immersion, fresh solution, hot or cold, up to 10 min. Cold darkens chromium carbides and tungstides; cementite not attacked. Hot attacks cementite.
1 g CrO ₃ and 100 mL H ₂ O	Electrolytic etch, 2–3 V dc, 20 °C (68 °F), 30 s, stainless steel cathode. MC and M ₇ C ₃ darkened; Mo ₂ C outlined
10 mL H ₂ O ₂ (30%) and 20 mL 10% aqueous NaOH	Immerse 10 s at 20 °C (68 °F). Fe ₂ MoC, Mo ₂ C, and M ₆ C outlined (latter also colored)
4 g KMnO ₄ (potassium permanganate), 4 g NaOH, and 100 mL H ₂ O	Groesbeck's reagent. Immerse at 20 °C (68 °F). Fe ₂ MoC and M ₄ C outlined and colored (blue and brown, respectively), Mo ₂ C colored brown, (Fe,Cr) ₂₃ C ₆ attacked but (Fe,Mo) ₂₃ Q not attacked
4 g NaOH and 100 mL saturated aqueous KMnO ₄	Immerse at 20 °C (68 °F). Mo ₂ C and M ₇ C ₃ attacked; M ₆ C outlined and colored brown
Saturated aqueous picric acid plus small amount of wetting agent	Prior-austenite grain-boundary etch for hardened steels. Many wetting agents can be used; sodium tridecylbenzene sulfonate most commonly used. Use at 20 to 100 °C (68 to 212 °F) by immersion for 2 to 60 min. Addition of approximately 1% HCl useful for higher-alloy grades. Room-temperature etching most common. Etching with solution in a beaker in an ultrasonic cleaner works well. Lightly backpolish to remove surface smut.
50 mL cold saturated aqueous Na ₂ S ₂ O ₃ (sodium thiosulfate) and 1 g K ₂ S ₂ O ₅ (potassium metabisulfite)	Klemm's I (tint etch) reagent. Immerse (never swab) at 20 °C (68 °F) for 40–100 s to color ferrite (blue or red) and martensite (brown). Cementite and austenite unaffected
1 g Na ₂ MoO ₄ (sodium molybdate) and 100 mL H ₂ O	Beraha's tint etch for cementite. Add 0.2–0.3 g NH ₄ F·HF (ammonium bifluoride). Add HNO ₃ to produce a pH of 2.5–3.0. Preetch sample with picral. Colors Fe ₃ C yellow-orange. Immerse up to 60 s; never swab.
3 g K ₂ S ₂ O ₅ , 10 g anhydrous Na ₂ S ₂ O ₃ , and 100 mL H ₂ O	Beraha's tint etch. Immerse (never swab) until surface is colored red-violet. Colors ferrite, martensite, bainite, and pearlite. Cementite unaffected

Anexo B



ACEROS PARA MAQUINARIA
SAE 5160



SAE 5160	COMPOSICIÓN QUÍMICA							PROPIEDADES MECÁNICAS						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Estado de suministro	Resistencia a la tracción Kg/mm ²	Límite elástico Kg/mm ²	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell
	0.56 / 0.64	0.75 / 1.00	0.035 máx.	0.040 máx.	0.15 / 0.35	0.70 / 0.90				Laminado en caliente	97	54	18	45	270/320
									Calibrado	73	28	20	50	255
									Bonificado	117	104	12	47	352
TRATAMIENTO TÉRMICO														
TRATAMIENTO					TEMPERATURA °C					ENFRIAMIENTO				
Normalizado					840-860°C					Aire				
Recocido					730-810°C					Horno				
Temple					850-870°C					Aceite				
Revenido					550-650°C					Aire				
Forja					850-1100°C					Ceniza o CAL				
CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES														
<p>CARACTERÍSTICAS: Acero caracterizado por su gran tenacidad, templabilidad resistencia a la fatiga y a la tracción debido a sus componentes elevados de carbono, cromo y manganeso.</p> <p>APLICACIONES: Utilizado en la industria automotriz en la fabricación de ballestas, muelles helicoidales para automóvil y ferrocarril, árboles de transmisión, barras de torsión, grandes engranajes, trabajando sin choque, cuchillas para corte en frío de metales, cuchillas para desbaste de madera, placas de presión para piezas de extrusión, cinceles, bielas, tajaderas, rotores de turbinas, piezas sometidas al desgaste.</p> <p>Soldadura: AWS E7018, E8018 / Dureza obtenida después de tratamiento térmico 57 - 59 HRC.</p>														
NORMAS EQUIVALENTES														
Din(Alem) 60Cr4 - AISI/SAE 5160														
PERFILES USUALES		<p>De 12mm a 25mm (1/2" a 1") De 38 x 6 mm a 127 x 25mm (1.1/2 x 1/4" a 5 x 1")</p>												

www.aceroscol.com - PBX: 447 5500

ACERO 5160

Propiedades:

Acero al alto carbono aleado al Cromo – Manganeso, de gran durabilidad en trabajo de compresión y tracción. Buena templabilidad. Es también conocido como acero muelle.

Forma de suministro

Redondos y soleras

Composición Química (Valores promedio, %)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.56 - 0.61	0.15 - 0.35	0.75 - 1.00	0.70 - 0.90	0.035 máx.	0.040 máx.

Aplicaciones:

Las aplicaciones incluyen resortes, muelles, cuchillos, ballestas y resortes planos de cualquier espesor. Se emplea además en barras de torsión, resortes de suspensión de automóviles

Anexo C

ACEROS Aceros bonificados para maquinaria

► Cód. IBCA: 705 ≅ 34 CrNiMo6 ≅ AISI 4340 ≅ AISI 4337



Información general

705 es un acero al molibdeno más cromo y níquel. El molibdeno tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. Ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados para maquinaria.

Al combinarse con níquel y cromo soporta altas exigencias de resistencia y tenacidad en secciones grandes. Su contenido de níquel le da más templabilidad, lo mismo que la resistencia en caliente.

705 combina alta resistencia mecánica (la mayor del mercado) con buena tenacidad. Este acero en forma standard es suministrado bonificado, por lo que no se requería luego un tratamiento térmico, sin embargo, si se desea mejores propiedades, puede ser templado al aceite. Susceptible de temple por inducción y también puede someterse a tratamiento de nitrurado.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
34 CrNiMo6	0,30 - 0,38	≤0,30	0,50 - 0,80	0,025	0,025	1,30 - 1,70	1,30 - 1,70	0,15 - 0,30
AISI 4337	0,35 - 0,40	0,20 - 0,35	0,60 - 0,80	0,04	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
AISI 4340	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	0,03	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
Código de color	Dorado / Azul							
Equivalencias	AISI / SAE (4337 - 4340) Din (34CrNiMo6)			W.Nr (1.6582) JIS (SNCM1)		AFNOR (35NCD6)		

Aplicaciones

1.-Partes de gran resistencia para la industria automotriz, como:

- Ejes.
- Cardanes.
- Cigüeñales.
- Ejes de leva Tornillería de alta resistencia.

2.-Partes para la construcción de maquinaria de trabajo pesado como:

- Árbol para trituradoras.
- Ejes de transmisión de grandes dimensiones.
- Engranajes de temple por llama, inducción o nitruración.
- Barras de torsión.
- Mandriles.
- Portaherramientas.

3.-Aplicaciones donde se requiere resistencia a la fatiga, como:

- En la construcción de equipo pesado para camiones, aviones, equipo militar, etc.

Propiedades mecánicas

En condición de suministro

Resistencia a la tracción	90 - 110 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 45 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 20 J
Dureza	270 - 330 HB

Tratamiento térmico

Recocido blando

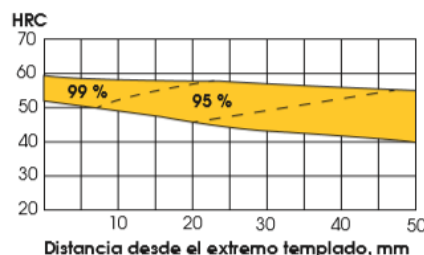
(650 - 700 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.

Alivio de tensiones

(450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 705 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.

Temple

(830 - 850 °C). Con enfriamiento en aceite: El mantenimiento del tiempo en minutos cuando la superficie ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego revenir inmediatamente.



► Cód. IBCA: 705 \cong 34 CrNiMo6 \cong AISI 4340 \cong AISI 4337



Propiedades	Tratamiento térmico														
<div style="background-color: #e0e0e0; text-align: center; padding: 5px;">Revenido</div> <p>(500 - 700 °C): El tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido podría ser de 1 - 2 horas o una hora por pulgada de grueso. Partes de máquinas que requieran una resistencia alta, como por ej. engranajes, deberán ser revenidas a temperaturas más bajas, es decir de 200 a 250 °C, lo que dará dureza de aproximadamente 500 HB.</p> <div style="text-align: center;"> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>Data for Revenido HRC vs. Temperature</caption> <thead> <tr> <th>Temperatura del revenido (°C)</th> <th>HRC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100</td><td>52</td></tr> <tr><td>200</td><td>51</td></tr> <tr><td>300</td><td>48</td></tr> <tr><td>400</td><td>44</td></tr> <tr><td>500</td><td>40</td></tr> <tr><td>600</td><td>35</td></tr> </tbody> </table> </div>	Temperatura del revenido (°C)	HRC	100	52	200	51	300	48	400	44	500	40	600	35	<div style="background-color: #e0e0e0; text-align: center; padding: 5px;">Nitruración</div> <p>Se pueden lograr durezas de alrededor de 53 - 55 HRC. El proceso durará entre 48 y 72 horas, por lo cual la planeación del tratamiento debe hacerse con el tiempo necesario.</p> <div style="text-align: center;"> </div>
Temperatura del revenido (°C)	HRC														
100	52														
200	51														
300	48														
400	44														
500	40														
600	35														

Anexo D

► Cód. IBCA: 709 ≅ 42 CrMo4 ≅ AISI 4140



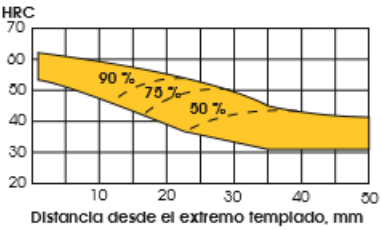
Información general							
709 es un acero aleado para construcción de maquinaria, que posee una alta resistencia especialmente en medidas pequeñas y medianas. Como norma, el 709 es suministrado templado y revenido (temple tenaz bonificado), por lo que no se requeriría un tratamiento térmico posterior, a no ser que así lo exija la aplicación y en ese caso, se templaría en aceite para obtener propiedades mecánicas más elevadas.							
709 es apropiado para templarse por flama e inducción y susceptible de nitrurar.							
Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,38 - 0,45	< 0,30	0,00 - 0,90	0,025	0,025	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30
AISI 4140	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25
Código de color	Dorado / Verde						
Equivalencias	AISI / SAE (4140)		W.Nr (1.7225)		AFNOR (42CD4)		
	Din (42CrMo4)		JIS (SCM4)				

Aplicaciones
<p>1. - Industria Automotriz Ejes, bielas, árboles de transmisión, cigüeñales, etc.</p> <p>2. - Maquinaria Engranajes de temple por flama, inducción o nitruración, partes de bombas, ejes de reductores, árboles de turbinas a vapor, tornillería de alta resistencia.</p> <p>3. - Industria petrolera Taladros, brocas, barrenos, cuerpos de escariadores, vástagos de pistón.</p>

Tratamiento térmico
<p>Recocido blando (680 - 720 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfrir en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.</p>
<p>Alivio de tensiones (450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 709 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfrir en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.</p>
<p>Temple (830 - 850 °C). Con enfriamiento en aceite: El tiempo de mantenimiento en minutos cuando ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7 x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego revenir inmediatamente.</p>

Propiedades mecánicas	
En condición de suministro	
Resistencia a la tracción	90 - 105 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 50 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 25 J
Dureza	275 - 320 HB

Nota: Estas propiedades mecánicas se dan hasta ø 100 mm. Medidas mayores, favor consultar.



► Cód. IBCA: 709 ≅ 42 CrMo4 ≅ AISI 4140



Propiedades	Tratamiento térmico
<div style="background-color: #f3f3f3; padding: 2px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Revenido</div> <p>(500 - 700 °C): El tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido podría ser de 1 - 2 horas luego de que la pieza ha llegado a la temperatura escogida.</p> <p style="text-align: center;">Temperatura del revenido °C</p>	<div style="background-color: #f3f3f3; padding: 2px; text-align: center; margin-bottom: 5px;">Nitruración</div> <p>Se pueden lograr durezas, con este proceso de alrededor de 53 - 55 HRC.</p>

Medidas en stock			
Redondo			
Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
25	3,9	85	45,5
28	4,9	90	51,0
32	6,5	95	56,9
35	7,7	100	63,0
38	9,1	105	69,5
40	10,1	120	90,7
45	12,8	125	98,4
50	15,8	130	106,5
55	19,1	140	123,5
60	22,7	155	151,4
65	26,0	160	161,3
70	30,9	170	182,1
75	35,4	180	204,1
80	40,3	200	252,0

* Medidas y pesos son teóricos IVAN BOHMAN C.A. facturará al peso del material una vez efectuado el corte

Anexo E

Tabla A-23

Propiedades esfuerzo-deformación media monótona y cíclica de aceros seleccionados Fuente: ASM Metals Reference Book, 2a. ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983, p. 217.

Grado e)	Orientación a)	Descripción f)	Resistencia		Reducción en área %	Deformación verdadera		Coeficiente de resistencia			Exponente de ductilidad a la fatiga c)	
			Dureza HB	S_u MPa		ϵ_f	Módulo de elasticidad E GPa	σ_f MPa	k	b		Coefficiente de ductilidad a la fatiga ϵ_f
A538A b)	L	STA	405	1 515 220	67	1.10	185	27	1 655 240	-0.065	0.30	-0.62
A538B b)	L	STA	460	1 860 270	56	0.82	185	27	2 135 310	-0.071	0.80	-0.71
A538C b)	L	STA	480	2 000 290	55	0.81	180	26	2 240 325	-0.07	0.60	-0.75
AM-350 c)	L	HR, A		1 315 191	52	0.74	195	28	2 800 406	-0.14	0.33	-0.84
AM-350 c)	L	CD		1 905 276	20	0.23	180	26	2 690 390	-0.102	0.10	-0.42
Galnec c)	IT	Lámina HR		530 77	58	0.86	200	29.2	805 117	-0.07	0.86	-0.65
Galnec c)	L	Lámina HR		510 74	64	1.02	200	29.2	805 117	-0.071	0.86	-0.68
H-11	L	Austornado		660 2 585 375	33	0.40	205	30	3 170 460	-0.077	0.08	-0.74
RQC-100 c)	IT	Placa HR		290 940 136	43	0.56	205	30	1 240 180	-0.07	0.66	-0.69
RQC-100 c)	L	Placa HR		290 930 135	67	1.02	205	30	1 240 180	-0.07	0.66	-0.69
10862	L	TyR		430 1 640 238	38	0.89	195	28	1 780 258	-0.067	0.32	-0.56
1005-1009	IT	Lámina HR		90 360 52	73	1.3	205	30	580 84	-0.09	0.15	-0.43
1005-1009	IT	Lámina CD		125 470 68	66	1.09	205	30	515 75	-0.059	0.30	-0.51
1005-1009	L	Lámina CD		125 415 60	64	1.02	200	29	540 78	-0.073	0.11	-0.41
1005-1009	L	Lámina HR		90 345 50	80	1.6	200	29	640 93	-0.109	0.10	-0.39
1015	L	Normalizado		80 415 60	68	1.14	205	30	825 120	-0.11	0.95	-0.64
1020	L	Placa HR		108 440 64	62	0.96	205	29.5	895 130	-0.12	0.41	-0.51
1040	L	Como sale de la forja		225 620 90	60	0.93	200	29	1 540 223	-0.14	0.61	-0.57
1045	L	TyR		225 725 105	65	1.04	200	29	1 225 178	-0.095	1.00	-0.66
1045	L	TyR		410 1 450 210	51	0.72	200	29	1 860 270	-0.073	0.60	-0.70
1045	L	TyR		390 1 345 195	59	0.89	205	30	1 585 230	-0.074	0.45	-0.68
1045	L	TyR		450 1 585 230	55	0.81	205	30	1 795 260	-0.07	0.35	-0.69
1045	L	TyR		500 1 825 265	51	0.71	205	30	2 275 330	-0.08	0.25	-0.68
1045	L	TyR		595 2 240 325	41	0.52	205	30	2 725 395	-0.081	0.07	-0.60
1144	L	CDSR		265 930 135	33	0.51	195	28.5	1 000 145	-0.08	0.32	-0.58

1144	L	DAT	305	1 035	150	25	0.29	200	28.8	1 585	230	-0.09	0.27	-0.53
1541F	L	Forjado TyR	290	950	138	49	0.68	205	29.9	1 275	185	-0.076	0.68	-0.65
1541F	L	Forjado TyR	260	890	129	60	0.93	205	29.9	1 275	185	-0.071	0.93	-0.65
4130	L	TyR	258	895	130	67	1.12	220	32	1 275	185	-0.083	0.92	-0.63
4130	L	TyR	365	1 425	207	55	0.79	200	29	1 695	246	-0.081	0.89	-0.69
4140	L	TyR, DAT	310	1 075	156	60	0.69	200	29.2	1 825	265	-0.08	1.2	-0.59
4142	L	DAT	310	1 060	154	29	0.35	200	29	1 450	210	-0.10	0.22	-0.51
4142	L	DAT	335	1 250	181	28	0.34	200	28.9	1 250	181	-0.08	0.06	-0.62
4142	L	TyR	380	1 415	205	48	0.66	205	30	1 825	265	-0.08	0.45	-0.75
4142	L	TyR y deformado	400	1 550	225	47	0.63	200	29	1 895	275	-0.09	0.50	-0.75
4142	L	TyR	450	1 760	255	42	0.54	205	30	2 000	290	-0.08	0.40	-0.73
4142	L	TyR y deformado	475	2 035	295	20	0.22	200	29	2 070	300	-0.082	0.20	-0.77
4142	L	TyR y deformado	450	1 930	280	37	0.46	200	29	2 105	305	-0.09	0.60	-0.76
4142	L	TyR	475	1 930	280	35	0.43	205	30	2 170	315	-0.081	0.09	-0.61
4142	L	TyR	560	2 240	325	27	0.31	205	30	2 655	385	-0.089	0.07	-0.76
4340	L	HR, A	243	825	120	43	0.57	195	28	1 200	174	-0.095	0.45	-0.54
4340	L	TyR	409	1 470	213	38	0.48	200	29	2 000	290	-0.091	0.48	-0.60
4340	L	TyR	350	1 240	180	57	0.84	195	28	1 655	240	-0.076	0.73	-0.62
5160	L	TyR	430	1 670	242	42	0.87	195	28	1 930	280	-0.071	0.40	-0.57
52100	L	SH, TyR	518	2 015	292	11	0.12	205	30	2 585	375	-0.09	0.18	-0.56
9262	L	A	260	925	134	14	0.16	205	30	1 040	151	-0.071	0.16	-0.47
9262	L	TyR	280	1 000	145	33	0.41	195	28	1 220	177	-0.073	0.41	-0.60
9262	L	TyR	410	565	227	32	0.38	200	29	1 855	269	-0.057	0.38	-0.65
950C d)	LT	Placa HR	159	565	82	64	1.03	205	29.6	1 170	170	-0.12	0.95	-0.61
950C d)	L	Borra HR	150	565	82	69	1.19	205	30	970	141	-0.11	0.85	-0.59
950X d)	L	Canal placa	150	440	64	65	1.06	205	30	625	91	-0.075	0.35	-0.54
950X d)	L	Placa HR	156	530	77	72	1.24	205	29.5	1 005	146	-0.10	0.85	-0.61
950X d)	L	Canal placa	225	695	101	68	1.15	195	28.2	1 055	153	-0.08	0.21	-0.53

Notas: a) Grado AISI/SAE, o menos que se indique lo contrario. b) Designación ASTM. c) Designación propietaria. d) Grado SAE HSA. e) Orientación del eje de la placa, relativa a la dirección del laminado; L es longitudinal (paralelo a la dirección del laminado); LT es transversal larga (perpendicular a la dirección del laminado); F) SRA, solución tróvil y envejecido; HR, laminado en caliente; CD, laminado en frío; TyR, templado y revenido; DSK, estado en frío óvulo de deformación; DAT, estado a temperatura; A, recocido. De ASM Metals Reference Book, 2a. ed., 1983, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002; tabla 217. Reproducido con permiso de ASM International®, www.asmtinternational.org.

Anexo F



Designation: E 3 – 01

Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation E 3; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 The primary objective of metallographic examinations is to reveal the constituents and structure of metals and their alloys by means of a light optical or scanning electron microscope. In special cases, the objective of the examination may require the development of less detail than in other cases but, under nearly all conditions, the proper selection and preparation of the specimen is of major importance. Because of the diversity in available equipment and the wide variety of problems encountered, the following text presents for the guidance of the metallographer only those practices which experience has shown are generally satisfactory; it cannot and does not describe the variations in technique required to solve individual specimen preparation problems.

NOTE 1—For a more extensive description of various metallographic techniques, refer to Samuels, L. E., *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*, American Society for Metals (ASM) Metals Park, OH, 3rd Ed., 1982; Petzow, G., *Metallographic Etching*, ASM, 1978; and VanderVoort, G., *Metallography: Principles and Practice*, McGraw Hill, NY, 2nd Ed., 1999.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 90/A 90M Standard Test Method for Weight (Mass) of Coating on Iron and Steel with Zinc or Zinc-Alloy Coatings
- E 7 Terminology Relating to Metallography²
- E 45 Practice for Determining the Inclusion Content of Steel²
- E 340 Test Method for Macroetching Metals and Alloys²
- E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys²
- E 768 Practice for Preparing and Evaluating Specimens for Automatic Inclusion Assessment of Steel²

- E 1077 Test Method for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens²
- E 1122 Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis²
- E 1245 Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis²
- E 1268 Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures²
- E 1558 Guide to Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens²
- E 1920 Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions used in this practice, refer to Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *castable mount*—a metallographic mount generally made from a two component castable plastic. One component is the resin and the other hardener. Both components can be liquid or one liquid and a powder. Castable mounts generally do not require heat and pressure to cure.

3.2.2 *compression mount*—a metallographic mount made using plastic that requires both heat and pressure for curing.

3.2.3 *planar grinding*—is the first grinding step in a preparation procedure used to bring all specimens into the same plane of polish. It is unique to semi or fully automatic preparation equipment that utilize specimen holders.

3.2.4 *rigid grinding disc*—a non-fabric support surface, such as a composite of metal/ceramic or metal/polymer charged with an abrasive (usually 6 to 15 μ m diamond particles), and used as the fine grinding operation in a metallographic preparation procedure.

4. Significance and Use

4.1 Microstructures have a strong influence on the properties and successful application of metals and alloys. Determination and control of microstructure requires the use of metallographic examination.

4.2 Many specifications contain a requirement regarding microstructure; hence, a major use for metallographic examination is inspection to ensure that the requirement is met. Other

¹ This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee E04 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography.

Current edition approved April 10, 2001. Published July 2001. Originally published as E 3 – 21 T. Last previous edition E 3 – 95.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

E 3

major uses for metallographic examination are in failure analysis, and in research and development.

4.3 Proper choice of specimen location and orientation will minimize the number of specimens required and simplify their interpretation. It is easy to take too few specimens for study, but it is seldom that too many are studied.

5. Selection of Metallographic Specimens

5.1 The selection of test specimens for metallographic examination is extremely important because, if their interpretation is to be of value, the specimens must be representative of the material that is being studied. The intent or purpose of the metallographic examination will usually dictate the location of the specimens to be studied. With respect to purpose of study, metallographic examination may be divided into three classifications:

5.1.1 *General Studies or Routine Work*—Specimens should be chosen from locations most likely to reveal the maximum variations within the material under study. For example, specimens could be taken from a casting in the zones wherein maximum segregation might be expected to occur as well as specimens from sections where segregation could be at a minimum. In the examination of strip or wire, test specimens could be taken from each end of the coils.

5.1.2 *Study of Failures*—Test specimens should be taken as closely as possible to the fracture or to the initiation of the failure. Before taking the metallographic specimens, study of the fracture surface should be complete, or, at the very least, the fracture surface should be documented. In many cases, specimens should be taken from a sound area for a comparison of structures and properties.

5.1.3 *Research Studies*—The nature of the study will dictate specimen location, orientation, etc. Sampling will usually be more extensive than in routine examinations.

5.2 Having established the location of the metallographic samples to be studied, the type of section to be examined must be decided.

5.2.1 For a casting, a section cut perpendicular to the surface will show the variations in structure from the outside to the interior of the casting.

5.2.2 In hot-worked or cold-worked metals, both transverse and longitudinal sections should be studied. Special investigations may require specimens with surfaces prepared parallel to the original surface of the product.

5.2.3 In the case of wire and small rounds, a longitudinal section through the center of the specimen proves advantageous when studied in conjunction with the transverse section.

5.3 Transverse sections or cross sections taken perpendicular to the main axis of the material are often used for revealing the following information:

- 5.3.1 Variations in structure from center to surface,
- 5.3.2 Distribution of nonmetallic impurities across the section,
- 5.3.3 Decarburization at the surface of a ferrous material (see Test Method E 1077),
- 5.3.4 Depth of surface imperfections,
- 5.3.5 Depth of corrosion,
- 5.3.6 Thickness of protective coatings, and
- 5.3.7 Structure of protective coating.

5.4 Longitudinal sections taken parallel to the main axis of the material are often used for revealing the following information:

5.4.1 Inclusion content of steel (see Practices E 45, E 768, E 1122, and E 1245),

5.4.2 Degree of plastic deformation, as shown by grain distortion,

5.4.3 Presence or absence of banding in the structure (see Practice E 1268), and

5.4.4 The microstructure attained with any heat treatment.

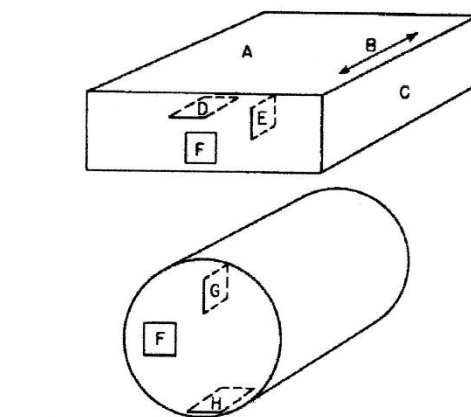
5.5 The locations of surfaces examined should always be given in reporting results and in any illustrative micrographs. A suitable method of indicating surface locations is shown in Fig. 1.

6. Size of Metallographic Specimens

6.1 For convenience, specimens to be polished for metallographic examination are generally not more than about 12 to 25 mm (0.5 to 1.0 in.) square, or approximately 12 to 25 mm in diameter if the material is cylindrical. The height of the specimen should be no greater than necessary for convenient handling during polishing.

6.1.1 Larger specimens are generally more difficult to prepare.

6.1.2 Specimens that are, fragile, oddly shaped or too small to be handled readily during polishing should be mounted to ensure a surface satisfactory for microscopical study. There are, based on technique used, three fundamental methods of mounting specimens (see Section 9).



Symbol in Diagram	Suggested Designation
A	Rolled surface
B	Direction of rolling
C	Rolled edge
D	Planar section
E	Longitudinal section perpendicular to rolled surface
F	Transverse section
G	Radial longitudinal section
H	Tangential longitudinal section

FIG. 1 Method of Designating Location of Area Shown in Photomicrograph.



7. Cutting of Metallographic Specimens

7.1 In cutting the metallographic specimen from the main body of the material, care must be exercised to minimize altering the structure of the metal. Three common types of sectioning are as follows:

7.1.1 Sawing, whether by hand or machine with lubrication, is easy, fast, and relatively cool. It can be used on all materials with hardnesses below approximately 350 HV. It does produce a rough surface containing extensive plastic flow that must be removed in subsequent preparation.

7.1.2 An abrasive cut-off blade will produce a smooth surface often ready for fine grinding. This method of sectioning is normally faster than sawing. The choice of cut-off blade, lubricant, cooling conditions, and the grade and hardness of metal being cut will influence the quality of the cut. A poor choice of cutting conditions can easily damage the specimen, producing an alteration of the microstructure. Generally, soft materials are cut with a hard bond blade and hard materials with a soft bond blade. Aluminum oxide abrasive blades are preferred for ferrous metals and silicon carbide blades are preferred for nonferrous alloys. Abrasive cut-off blades are essential for sectioning metals with hardness above about 350 HV. Extremely hard metallic materials and ceramics may be more effectively cut using diamond-impregnated cutting blades. Manufacturer's instructions should be followed as to the choice of blade. Table 1 lists the suggested cutoff blades for materials with various Vickers (HV) hardness values.

7.1.3 A shear is a type of cutting tool with which a material in the form of wire, sheet, plate or rod is cut between two opposing blades.

7.2 Other methods of sectioning are permitted provided they do not alter the microstructure at the plane of polishing. All cutting operations produce some depth of damage, which will have to be removed in subsequent preparation steps.

8. Cleanliness

8.1 Cleanliness (see Appendix X1) during specimen preparation is essential. All greases, oils, coolants and residue from cutoff blades on the specimen should be removed by some suitable organic solvent. Failure to clean thoroughly can prevent cold mounting resins from adhering to the specimen surface. Ultrasonic cleaning may be effective in removing the last traces of residues on a specimen surface.

8.2 Any coating metal that will interfere with the subsequent etching of the base metal should be removed before

polishing, if possible. If etching is required, when studying the underlying steel in a galvanized specimen, the zinc coating should be removed before mounting to prevent galvanic effects during etching. The coating can be removed by dissolving in cold nitric acid (HNO₃, sp gr 1.42), in dilute sulfuric acid (H₂SO₄) or in dilute hydrochloric acid (HCl). The HNO₃ method requires care to prevent overheating, since large samples will generate considerable heat. By placing the cleaning container in cold water during the stripping of the zinc, attack on the underlying steel will be minimized. More information may be found in Test Method A 90/A 90M.

NOTE 2—Picral etchant produces little or no galvanic etching effects when used on galvanized steel.

NOTE 3—The addition of an inhibitor during the stripping of Zn from galvanized coatings will minimize the attack of the steel substrate. NEP (polyethylene polyamine) or SbCl₃ are two useful inhibitors.

8.3 Oxidized or corroded surfaces may be cleaned as described in Appendix X1.

9. Mounting of Specimens

9.1 There are many instances where it will be advantageous to mount the specimen prior to grinding and polishing. Mounting of the specimen is usually performed on small, fragile, or oddly shaped specimens, fractures, or in instances where the specimen edges are to be examined.

9.2 Specimens may be either mechanically mounted, mounted in plastic, or a combination of the two.

9.3 Mechanical Mounting:

9.3.1 Strip and sheet specimens may be mounted by binding or clamping several specimens into a pack held together by two end pieces and two bolts.

9.3.2 The specimens should be tightly bound together to prevent absorption and subsequent exudation of polishing materials or etchants.

9.3.3 The use of filler sheets of a softer material alternated with the specimen may be used in order to minimize the seepage of polishing materials and etchants. Use of filler material is especially advantageous if the specimens have a high degree of surface irregularities.

9.3.4 Filler material *must* be chosen so as not to react electrolytically with the specimen during etching. Thin pieces of plastic, lead, or copper are typical materials that are used. Copper is especially good for steel specimens since the usual etchants for steels will not attack the copper.

9.3.5 Alternatively, the specimens may be coated with a layer of epoxy resin before being placed in the clamp in order to minimize the absorption of polishing materials or etchants.

9.3.6 The clamp material should be similar in composition to the specimen to avoid galvanic effects that would inhibit etching. The specimen will not etch if the clamp material is more readily attacked by the etchant.

9.3.7 The clamp should preferably be of similar hardness as the specimens to minimize the rounding of the edges of the specimens during grinding and polishing.

9.3.8 Exercise care in clamping the specimen. Excessive clamping pressure may damage soft specimen.

9.4 Plastic Mounting:

9.4.1 Specimens may be embedded in plastic to protect them from damage and to provide a uniform format for both

TABLE 1 Cutoff Blade Selection

Hardness HV	Materials	Abrasive	Bond	Bond Hardness
up to 300	non-ferrous (Al, Cu)	SiC	P or R	hard
up to 400	non-ferrous (Ti)	SiC	P or R	med. hard
up to 400	soft ferrous	Al ₂ O ₃	P or R	hard
up to 500	medium soft ferrous	Al ₂ O ₃	P or R	med. hard
up to 600	medium hard ferrous	Al ₂ O ₃	P or R	medium
up to 700	hard ferrous	Al ₂ O ₃	P or R&R	med. soft
up to 800	very hard ferrous	Al ₂ O ₃	P or R&R	soft
> 800	extremely hard ferrous	CBN	P or M	hard
	more brittle ceramics	diamond	P or M	very hard
	tougher ceramics	diamond	M	ext. hard

P—phenolic
 R—rubber
 R&R—resin and rubber
 M—metal

E 3

manual and automatic preparation. This is the most common method for mounting metallographic specimens. Mounting plastics may be divided into two classes—compression and castable.

9.4.2 The choice of a mounting compound will influence the extent of edge rounding observed during the grinding and polishing operations. There are several methods available that minimize rounding. The specimen may be surrounded by hard shot, small rivets, rings, etc., of approximately the same hardness or, when using a castable resin, a slurry of resin and alumina may be poured around the specimen. The specimen may also be plated before mounting (see Section 10). Many mounting procedures result in sharp edges on the mount corners. The corners should be beveled to remove any plastic mounting flash.

9.4.3 *Compression Mounting*—There are four types of compression mounting plastics used predominantly in the metallographic laboratory (see Table 2). These plastics require the use of a mounting press providing heat (140-180°C) and force (27-30 MPa). Thermosetting plastics can be ejected hot but the best results are obtained when the cured mount is cooled under pressure. Thermoplastic compounds do not harden until cooled and therefore should not be ejected while hot. Regardless of the resin used, the best results are obtained when (1) the specimen is clean and dry, and (2) the cured mount is cooled under full pressure to below 40°C before ejection from the press. This will ensure minimal shrinkage gap formation.

9.4.4 *Castable Plastics*—Castable mounts are usually prepared at room temperature. Some may require an external heat source or applied pressure in order to cure. These resins consist of two or more components which must be mixed just prior to use. There are four kinds of castable plastics in common use (see Table 3).

9.4.5 The molds for castable plastics are often simple cups that hold the resin until it cures. They may be reusable or not; the choice is a matter of convenience and cost. Handling castable resins requires care. They all can cause dermatitis. Manufacturers' recommendations for mixing and curing must be followed to obtain best results.

9.5 *Mounting Porous Specimen:*

9.5.1 Porous or intricate specimens may be vacuum impregnated in order to fill voids, prevent contamination and seepage, and prevent loss of friable or loose components. Impregnation is accomplished by placing the specimen in a mold in a vacuum chamber and then introducing the resin into the mold after the chamber has been evacuated. The introduction of the resin into the mold can be accomplished either by having a funnel or stopcock fitted to the vacuum chamber or by having a basin of the resin present inside the chamber. A low-viscosity resin will produce the best results. The pressure in the chamber must remain above the critical vapor pressure of the hardener to

avoid boiling away the hardener. After the pressure has equilibrated, the resin is introduced into the mold and the vacuum is released and air admitted to the chamber. Atmospheric pressure will force the resin into fine pores, cracks, and holes.

9.5.2 If a low-viscosity resin is used, the funnel and stopcock may be eliminated. The specimen and resin are placed in the mold prior to evacuation. The air in the specimen will bubble out through the resin. Exercise care to ensure the hardening agent is not evaporated during evacuation. Dipping the specimen in the resin prior to placing it in the mold may help in filling voids.

9.5.3 Vacuum impregnation is an effective method for ensuring optimal results for porous metallographic mounts. It is imperative that the specimens be completely dry prior to impregnation.

9.5.4 A more rapid technique but less effective method is to lacquer the specimens with one of the formulations used by the canning industry to line food containers. The formulations are highly penetrating and the cure is a short time at low temperatures. After lacquering, the specimens are mounted in the usual fashion.

10. Plating of Specimens

10.1 Specimens such as fractures or those where it is necessary to examine the edges, are often plated to obtain good edge retention. Plating can be done electrolytically or with electroless solutions. These specimens are invariably mounted prior to the grinding and polishing procedures. Electroless plating solutions can be purchased commercially.

10.2 Thoroughly clean the specimen surface prior to plating to ensure good adhesion of the plating. Avoid industrial cleaning treatments that are too harsh and may cause damage to the specimen surface. Milder cleaning treatments that involve detergents, solvents, mild alkaline, or acidic solutions are recommended.

10.3 Chromium, copper, iron, nickel, gold, silver, and zinc may be electrolytically deposited although copper and nickel are predominantly used in metallographic laboratories.

10.3.1 Ferrous metals are commonly plated electrolytically with nickel or copper. A flash coat in a copper or electroless nickel bath can be first applied for specimens that are difficult to electroplate.

10.3.2 Nonferrous metals may be plated with silver and the precious metals may be plated with nickel, gold, or silver.

10.4 The plating material should not react galvanically with the base metal of the specimen during plating, polishing, or etching.

10.5 Electroless plating is preferred to electrolytic plating

TABLE 2 Characteristics of Hot-Compression Mounting Compounds

Type of Compound	Characteristics
Acrylic	thermoplastic, cure time 10-15 min, optically clear, moderate shrinkage, low abrasion resistance, degraded by hot etchants
Diallyl phthalate ^A	thermosetting, cure time 5-10 min, opaque, minimal shrinkage, good resistance to etchants, moderate abrasion resistance
Epoxy ^A	thermosetting, cure time 5-10 min, opaque, very low shrinkage, good resistance to etchants, high abrasion resistance
Phenolic ^A (Bakelite)	thermosetting, cure time 5-10 min, opaque, moderate shrinkage, degraded by hot etchants, moderate abrasion resistance

^A These compounds may be filled with wood flour, glass fiber or mineral particulate.



TABLE 3 Characteristics of Castable Mounting Compounds

Type of Compound	Characteristics
Acrylic	Cure time 8-15 min, moderate shrinkage, peak curing temperature can reach 90-120°C during polymerization, low abrasion resistance, opaque to transparent
Polyester-acrylic (quartz-filled)	Cure time 8-15 min, very low shrinkage, peak curing temperature can reach 90-120°C during polymerization, high abrasion resistance, opaque
Polyester	Cure time 30-60 min, high shrinkage, peak curing temperature can reach 90-120 C during polymerization, moderate abrasion resistance, transparent
Epoxy	Cure time 1/2-20 h, very low shrinkage, good adhesion, low heat generation during polymerization, moderate abrasion resistance, low viscosity (good for vacuum impregnation), transparent

for specimens with rough, porous, or irregular surfaces, because the electroless solution provides better surface coverage and penetration.

10.6 Active metals such as zinc and aluminum are difficult to plate. Sometimes a flash cyanide copper plate can be deposited, which then can be followed by normal plating from a sulfate bath. Evaporated coatings of copper, gold, or chromium may also be used as starter coatings.

10.7 It is recommended that the plating thickness be at least 5µm.

11. Grinding and Polishing

General Information

11.1 Many metals and alloys can be prepared using a similar sequence of grinding and polishing. Hard alloys may require greater pressure than soft alloys. The major differences will be in the final polishing. Some metals and alloys will require specific combinations of abrasive and support material, but a surprising number can be handled by the same procedure. Supplies and instructions for grinding, lapping, and polishing are readily obtainable from laboratory supply houses.

11.2 *Grinding*—Grinding can be done in a number of ways, ranging from rubbing the specimen on a stationary piece of abrasive paper to the use of automatic devices. The choice of method depends on the number and type of specimens to be done, financial considerations and requirements such as flatness and uniformity.

11.2.1 Abrasive grit size designations in this practice are expressed in the ANSI (American National Standards Institute) or CAMI (Coated Abrasives Manufacturers Institute) system units with the corresponding FEPA (European Federation of Abrasive Producers) numbers in parentheses. Table 4 provides a correlation between these two systems and the approximate median particle diameter for a given size in micrometres.

11.2.2 Grinding should start with the finest paper, platen or stone capable of flattening the specimen and removing the effects of prior operations, such as sectioning. The subsequent steps should remove the effects of previous ones in a short time. Grinding consists of two stages- planar (rough) and fine.

11.2.3 Planar or rough grinding [240 grit (P220) and coarser] may be performed on belts, rotating wheels or stones. In some methods, diamond abrasives are used on rigid platens. Planar grinding may be used to accomplish the following:

- 11.2.3.1 Flatten an irregular or damaged cut surface,
- 11.2.3.2 Remove sectioning damage, scale and other surface conditions prior to mounting,
- 11.2.3.3 Remove substantial amounts of specimen material to reach a desired plane for polishing,

TABLE 4 European/USA Grit Grade Comparison Guide

Grit Number	FEPA		ANSI/CAMI	
	Size (µm)	Grit Number	Size (µm)	Grit Number
P120	125.0	120	116.0	120
P150	100.0	180	78.0	180
P220	68.0	220	66.0	220
P240	58.5	...	...	...
P280	52.2	240	51.8	240
P320	46.2	...	...	...
P360	40.5	280	42.3	280
P400	35.0	320	34.3	320
P500	30.2	...	...	...
P600	25.8	360	27.3	360
P800	21.8	400	22.1	400
P1000	18.3	500	18.2	500
P1200	15.3	600	14.5	600
P1500	12.6	800	11.5	800
P2000	10.3	1000	9.5	1000
P2500	8.4	1500	8.0	1500
P4000 ^A	5.0	...	...	...

^A Not found in the FEPA grading system.

ANSI—American National Standards Institute

CAMI—Coated Abrasives Manufacturers Institute

FEPA—European Federation of Abrasive Producers

11.2.3.4 Level the mount surface.

11.2.4 In fine grinding, damage to the specimen incurred from the planar or rough grinding step must be removed. The specimen is either ground on successively finer abrasive papers (using water to wash away grinding debris and to act as a coolant) or on a rigid disc or cloth charged with a suitable abrasive.

11.2.5 After all grinding is done, the specimen must be cleaned thoroughly. Ultrasonic cleaning in a water/soap solution containing a corrosion inhibitor may prove beneficial.

11.3 *Polishing*—Polishing is usually distinguished from grinding by the use of loose abrasive (≤6µm) embedded in an appropriately lubricated supporting surface. The choice of abrasive, lubricant, and polishing surface support is often specific to the metal and the object of the investigation. Polishing can be divided into rough and fine (final) stages.

11.3.1 Rough polishing is often sufficient for routine evaluations like microindentation hardness and grain size.

11.3.2 When fine polishing is required, it may be performed with diamond or an oxide slurry step or both. The choice of final polishing abrasive type and size is dictated by the hardness of the specimen. For instance, a 1µm diamond final polish is often sufficient for many grades of steel, however, softer steels and non-ferrous materials often require an additional polishing step with an oxide slurry or suspension of SiO₂ or Al₂O₃. Final polishing cloths are generally softer and higher in nap than rough polishing cloths. Therefore, polishing time and force must be kept to a minimum to avoid artifacts such as



edge rounding and relief.

11.3.3 Careful cleaning of the specimen between stages is mandatory to prevent contamination by coarser abrasive. Ultrasonic cleaning may be effective.

11.3.4 The polishing operations may be conducted by manual or by automated methods (preferred).

Manual (Hand-held) Methods

11.4 When grinding manually, the specimen should be moved back and forth across the paper to allow for even wear. Between grinding steps, the specimen should be rotated 45-90°. At the end of grinding on each paper, the surface of the specimen and its mount, if any, should be flat with one set of unidirectional grinding scratches.

11.5 Manual polishing methods consist of holding the specimen by hand against an abrasive-charged rotating wheel and moving the specimen in a circular path around the wheel against the direction of rotation of the wheel. The specimen should be held firmly in contact with the wheel.

11.6 The amount of force applied along with the rate of movement of the specimen during grinding and polishing is a matter of personal preference and experience. In the preparation of difficult materials such as thermally sprayed coatings or composites, the operating parameters must be strictly controlled.

11.7 A traditional manual preparation sequence consists of a series of grinding and polishing steps and may be similar to those listed in Table 5.

Automated Methods

11.8 Many styles of automated specimen preparation machinery are available. Most units can perform grinding and polishing steps. Many use holders capable of accommodating multiple specimens. Major advantages of automated grinding and polishing procedures are the consistent quality of specimen preparation and the substantial decrease in time. Therefore, automated techniques are recommended over manual techniques.

11.9 Most of the devices for automated grinding and polishing move the specimen around a rotating wheel covered

with abrasive so that the specimen follows an epicycloid path. In some devices, the specimen rotates on its own axis as well. The resulting scratch pattern now consists of randomly oriented arcs. Deciding when the previous scratches have been removed is more difficult than with directional (manual) grinding. The specimen surface should show uniform scratches before proceeding to the next step. Cleaning between stages is required to prevent carryover of abrasives and contamination of subsequent preparation surfaces.

11.10 Table 5 illustrates a traditional automated preparation method. This method uses conventional SiC papers for grinding and is suitable for all but the hardest of materials. Tables 6 and 7 are preparation methods that utilize rigid grinding discs or cloths for fine grinding. The method in Table 6 has been shown to be effective for the preparation of materials harder than HRC45. The method in Table 7 may be used for the preparation of materials softer than HRC45. These procedures may produce excellent results outside of the recommended hardness ranges.

12. Special Procedures

12.1 Occasionally, the metallographer is faced with the preparation of unfamiliar specimens or with special situations. Anticipation of every possible situation is, of course, impossible but some guidance can be offered.

12.1.1 When used properly, electrolytic polishing can produce near deformation-free surfaces but works best on solid solution alloys. Once the operating parameters are set, specimens can be prepared quickly. See Guide E 1558.

12.1.2 Vibratory polishing produces excellent results on many materials. Although slow, a number of specimens can be prepared simultaneously. It is especially advantageous for soft materials.

12.2 *Porous Specimens*—Specimens with continuous or open pores can be vacuum-impregnated (see 9.5) with epoxy. Specimens with closed pores are mounted by a suitable method, ground through the fine grinding stage, cleaned, and dried thoroughly. The surface is then wiped with epoxy mounting compound, usually the same material used to mount the specimen, to seal the pores. After hardening, the last

TABLE 5 Preparation Method 1 (General Use)

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force ^A N(lbf)	Platen RPM ^B	Rotation
Planar Grinding paper/stone	water	120-320 (P120-400) grit SiC/Al ₂ O ₃	15-45	20-30 (5-8)	200-300 ^C	CO ^D
Fine Grinding paper	water	240 (P220) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
paper	water	320 (P500) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
paper	water	600 (P1200) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	6µm diamond	120-300	20-30 (5-8)	100-150	CO
Final Polishing med./high nap cloth	compatible lubricant	1µm diamond	60-120	10-20 (3-5)	100-150	CO
synthetic suede ^E	water	0.04µm colloidal silica or 0.05µm alumina	30-60	10-20 (3-5)	100-150	CONTRA ^F

^A Force per 30 mm (1¼ in.) diameter mount.

^B Power heads generally rotate between 25 and 150 rpm.

^C High-speed stone grinders generally rotate at greater than 1000 rpm.

^D Complimentary rotation, surface and specimen rotate in same direction.

^E Optional step.

^F Contra rotation, surface and specimen rotate in opposite directions.



TABLE 6 Preparation Method 2 for Harder Materials ≥ HRC 45 (450 HV)

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force ^A N(lbf)	Platen RPM ^B	Rotation
Planar Grinding paper/stone	water	120–320 (P120–400) grit SiC/Al ₂ O ₃	15–45	20–30 (5–8)	200–300 ^C	CO ^D
Fine Grinding rigid disc	compatible lubricant	6–15µm diamond	180–300	20–30 (5–8)	100–150	CO
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	3–6µm diamond	120–300	20–30 (5–8)	100–150	CO
Final Polishing med./high nap cloth	compatible lubricant	1µm diamond	60–120	10–20 (3–5)	100–150	CO
synthetic suede ^E	water	0.04µm colloidal silica or 0.05µm alumina	30–60	10–20 (3–5)	100–150	CONTRA ^F

^A Force per 30 mm (1¼ in.) diameter mount.
^B Power heads generally rotate between 25 and 150 rpm.
^C High-speed stone grinders generally rotate at greater than 1000 rpm.
^D Complimentary rotation, surface and specimen rotate in same direction.
^E Optional step.
^F Contra rotation, surface and specimen rotate in opposite directions.

TABLE 7 Preparation Method 3 for Softer Materials ≤ HRC 45 (450 HV)

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force ^A N(lbf)	Platen RPM ^B	Rotation
Planar Grinding paper/stone	water	120–320 (P120–400) grit SiC/Al ₂ O ₃	15–45	20–30 (5–8)	200–300 ^C	CO ^D
Fine Grinding heavy nylon cloth	compatible lubricant	6–15µm diamond	180–300	20–30 (5–8)	100–150	CO
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	3–6µm diamond	120–300	20–30 (5–8)	100–150	CO
Final Polishing med./high nap cloth	compatible lubricant	1µm diamond	60–120	10–20 (3–5)	100–150	CO
synthetic suede ^E	water	0.04µm colloidal silica or 0.05µm alumina	30–60	10–20 (3–5)	100–150	CONTRA ^F

^A Force per 30 mm (1¼ in.) diameter mount.
^B Power heads generally rotate between 25 and 150 rpm.
^C High-speed stone grinders generally rotate at greater than 1000 rpm.
^D Complimentary rotation, surface and specimen rotate in same direction.
^E Optional step.
^F Contra rotation, surface and specimen rotate in opposite directions.

fine-grinding stage is repeated to remove the excess material, and specimen preparation is continued as usual. The choice of epoxy for impregnation depends on the nature of the specimen. It should be inert toward the specimen.

12.3 *Composite Materials*—Composite materials, particularly hard fibers in a soft matrix or wires in a soft insulation, can be particularly difficult to prepare. The best approach is to first seal or impregnate pores or holes. Then grind carefully, using copious lubrication. The grinding surface must be kept flat and firm. In the polishing stages, the substrate should have no nap and should be fairly hard. Diamond abrasive is recommended. Both will minimize rounding of the hard components. Sometimes, a compromise will have to be made between accepting a few artifacts such as scratches or rounded edges.

12.4 *Coated Materials:*

12.4.1 Coated metals, such as galvanized steel, electroplated metal, enamel ware, and so forth, can be considered a variety of composite materials. They present problems of their own, such as flaking, chipping, and rounding. For example, some coatings are so thin as to be unresolvable on simple cross sections (tinplate). Other problems are the presence of a soft coating on a harder substrate (galvanized steel) or a hard brittle coating on a soft substrate (porcelain enamel on aluminum).

12.4.1.1 The problem of thin coatings can be handled by using a taper mount. In this method, the specimen is mounted so that the plane of polish is at a small angle to the plane of the surface. For example, a tapered plug is inserted in the mounting press with the taper up. A blank tapered mount is prepared. Masking tape is wrapped around the circumference of the mount to make a well on the tapered end. A small amount of epoxy mounting compound is mixed. The specimen, cut to fit inside the well, is wetted with the epoxy and laid on the face of the tapered mount, coated side up. Using a probe, the specimen is pressed down firmly onto the tapered face. The balance of the epoxy compound is added and allowed to harden. The mounted specimen is ground and polished on the epoxy face in the conventional manner exercising care that the plane of polish is perpendicular to the cylindrical axis of the mount. This is easily done with most automatic grinding machines.

12.4.1.2 The problem of soft coatings can be solved by the use of a suitable backup. A piece of spring steel is useful to hold the backup in place, or the backup may be cemented to the specimen. The cement can act as an insulation to minimize galvanic effects. Caution: some cements will dissolve in epoxy mounting compounds. A particularly suitable backup is another piece of the same material, with the coating sandwiched in. Another solution is to add another coating, for example,

 E 3

electroplate. However, this may introduce undesirable galvanic effects during etching. Galvanic problems may arise also from the interaction of the coating and its substrate. The mounting procedure used must result in excellent adhesion to the coated surface to minimize edge rounding. If edge rounding persists, the polishing time and applied force may have to be decreased.

12.4.1.3 Hard coatings on softer substrates can be mounted with a backup piece or a hard-filled mounting compound. Diamond abrasives on a napless cloth will minimize surface relief during polishing.

12.5 Fragile specimens should be mounted in one of the castable mounting formulations. Vacuum impregnation will ensure filling of holes and cavities (see 9.5). Thin walls can be reinforced by electroless nickel plating, which will alleviate the rounding problem.

12.6 Likewise, friable specimens can be bound together by impregnation with plastic or by electroless nickel plating, or both. Further guidance can be found in texts on preparation of mineralogical specimens.

13. Precision and Bias

13.1 Because use of this practice does not produce numerical results, no statement of precision or bias is possible.

14. Keywords

14.1 alloys; grinding; metallography; metals; mounting; polishing; sectioning; specimen preparation (metallographic)

Anexo G



Designation: E415 – 15

Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry¹

This standard is issued under the fixed designation E415; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the simultaneous determination of 21 alloying and residual elements in carbon and low-alloy steels by spark atomic emission vacuum spectrometry in the mass fraction ranges shown Note 1.

Element	Composition Range, %	
	Applicable Range, Mass Fraction % ^A	Quantitative Range, Mass Fraction % ^B
Aluminum	0 to 0.093	0.006 to 0.093
Antimony	0 to 0.027	0.006 to 0.027
Arsenic	0 to 0.1	0.003 to 0.1
Boron	0 to 0.007	0.0004 to 0.007
Calcium	0 to 0.003	0.002 to 0.003
Carbon	0 to 1.1	0.02 to 1.1
Chromium	0 to 8.2	0.007 to 8.14
Cobalt	0 to 0.20	0.006 to 0.20
Copper	0 to 0.5	0.006 to 0.5
Manganese	0 to 2.0	0.03 to 2.0
Molybdenum	0 to 1.3	0.007 to 1.3
Nickel	0 to 5.0	0.006 to 5.0
Niobium	0 to 0.12	0.003 to 0.12
Nitrogen	0 to 0.015	0.01 to 0.055
Phosphorous	0 to 0.085	0.006 to 0.085
Silicon	0 to 1.54	0.02 to 1.54
Sulfur	0 to 0.055	0.001 to 0.055
Tin	0 to 0.061	0.005 to 0.061
Titanium	0 to 0.2	0.001 to 0.2
Vanadium	0 to 0.3	0.003 to 0.3
Zirconium	0 to 0.05	0.01 to 0.05

^A Applicable range in accordance with Guide E1763 for results reported in accordance with Practice E1950.

^B Quantitative range in accordance with Practice E1601.

NOTE 1—The mass fraction ranges of the elements listed have been established through cooperative testing² of reference materials.

1.2 This test method covers analysis of specimens having a diameter adequate to overlap and seal the bore of the spark stand opening. The specimen thickness can vary significantly

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E01 on Analytical Chemistry for Metals, Ores, and Related Materials and is the direct responsibility of Subcommittee E01.01 on Iron, Steel, and Ferroalloys.

Current edition approved Nov. 15, 2015. Published March 2016. Originally approved in 1971. Last previous edition approved in 2014 as E415 – 14. DOI: 10.1520/E0415-15.

² Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:E01-1122. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

according to the design of the spectrometer stand, but a thickness between 10 mm and 38 mm has been found to be most practical.

1.3 This test method covers the routine control analysis in iron and steelmaking operations and the analysis of processed material. It is designed for chill-cast, rolled, and forged specimens. Better performance is expected when reference materials and specimens are of similar metallurgical condition and composition. However, it is not required for all applications of this standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
- E135 Terminology Relating to Analytical Chemistry for Metals, Ores, and Related Materials
- E305 Practice for Establishing and Controlling Atomic Emission Spectrochemical Analytical Curves
- E350 Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron
- E406 Practice for Using Controlled Atmospheres in Spectrochemical Analysis
- E1019 Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques
- E1329 Practice for Verification and Use of Control Charts in Spectrochemical Analysis
- E1601 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Evaluate the Performance of an Analytical Method
- E1763 Guide for Interpretation and Use of Results from

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.



Interlaboratory Testing of Chemical Analysis Methods (Withdrawn 2015)⁴

E1806 Practice for Sampling Steel and Iron for Determination of Chemical Composition

E1950 Practice for Reporting Results from Methods of Chemical Analysis

E2972 Guide for Production, Testing, and Value Assignment of In-House Reference Materials for Metals, Ores, and Other Related Materials

2.2 Other ASTM Documents

ASTM MNL 7 Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis⁵

3. Terminology

3.1 For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology E135.

4. Summary of Test Method

4.1 A capacitor discharge is produced between the flat, ground surface of the disk specimen and a conically shaped electrode. The discharge is terminated at a predetermined intensity time integral of a selected iron line, or at a predetermined time, and the relative radiant energies of the analytical lines are recorded. The most sensitive lines of arsenic, boron, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, and tin lie in the vacuum ultraviolet region. The absorption of the radiation by air in this region is overcome by evacuating the spectrometer or by use of a vacuum ultraviolet (VUV) transparent gas and flushing the spark chamber with argon.

5. Significance and Use

5.1 This test method for the spectrometric analysis of metals and alloys is primarily intended to test such materials for compliance with compositional specifications. It is assumed that all who use this test method will be analysts capable of performing common laboratory procedures skillfully and safely. It is expected that work will be performed in a properly equipped laboratory.

6. Apparatus

6.1 Sampling Devices:

6.1.1 Refer to Practice E1806 for devices and practices to sample liquid and solid iron and steel.

6.2 *Excitation Source*, capable of providing electrical parameters to spark a sample. See 11.1 for details.

6.3 *Spark Chamber*, automatically flushed with argon. The spark chamber shall be mounted directly on the spectrometer and shall be provided with a spark stand to hold a flat specimen and a lower counter electrode of rod form.

6.3.1 Follow the manufacturer's recommendations for cleaning the spark chamber. During continuous operation, this typically should be done every 24 h. Follow the manufacturer's recommendations for cleaning the entrance lens or window

(verifier data or other reference sample intensity data can typically indicate when this is necessary).

6.4 *Spectral Lines*—Table 1 lists spectral lines and internal standards usable for carbon and low alloy steel. The spectrometer must be able to measure at least one of the listed spectral lines for each of the listed elements. Spectral lines other than those listed in Table 1 may be used provided it can be shown experimentally that equivalent precision and accuracy are obtained.

6.5 *Measuring System*, spectrometer capable of converting light intensities to measurable electrical signals. The measuring system may consist of one of the following configurations:

6.5.1 A photomultiplier (PMT) array having individual voltage adjustments, capacitors in which the output of each photomultiplier is stored, a voltage measuring system to register the voltages on the capacitors either directly or indirectly, and the necessary switching arrangements to provide the desired sequence of operation.

6.5.2 A semiconductor detector array (CCD or CMOS), pixel selection electronics to reset the pixels and to transport the voltage of an individual pixel to one or more output ports of the detector arrays, and a voltage measuring system to register the voltage of said output ports.

6.5.3 A hybrid design using both photomultipliers and semiconductor arrays.

6.6 *Optical Path*—If the instrument is operated using a VUV transparent gas, check the manufacturer's suggested gas purity. It may be necessary to have a gas purification system consisting of a circulation pump and a cleaning cartridge to keep the O₂ (g) residual <500 ng/g and H₂O (g) residual <1 µg/g and remove impurities of nitrogen and hydrocarbons. If the instrument is using a vacuum pump, it should be capable of maintaining a vacuum of 3.33 Pa (25 µm Hg) or less.

NOTE 2—A pump with a displacement of at least 0.23 m³/min (8 ft³/min) is usually adequate.

6.7 *Gas System*, consisting of an argon supply with pressure and flow regulation. Automatic sequencing shall be provided to actuate the flow at a given rate for a specific time interval. The flow rate may be manually or automatically set. The argon system shall be in accordance with Practice E406.

7. Reagents and Materials

7.1 *Counter Electrodes*—The counter electrodes can be silver or thoriated tungsten rods, or other material, provided it can be shown experimentally that equivalent precision and bias are obtained. The rods can vary in diameter from 1.5 mm to 6.5 mm (depending on the instrument design) and typically are machined to a 90° or 120° angled tip.

7.1.1 A black deposit will collect on the tip of the electrode. This deposit should be removed between specimens (typically with a wire brush). If not removed, it can reduce the overall intensity of the spectral radiation or transfer slight amounts of contamination between specimens, or both. The number of acceptable burns on an electrode varies from one instrument to another, and should be established in each laboratory.

NOTE 3—It has been reported that thousands of burns can be performed on a thoriated tungsten electrode before replacement is necessary.

⁴ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

⁵ ASTM Manual Series, ASTM International, 8th edition, 2010.

Anexo H



Designation: E18 – 15

An American National Standard

Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials^{1,2}

This standard is issued under the fixed designation E18; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the Rockwell hardness and the Rockwell superficial hardness of metallic materials by the Rockwell indentation hardness principle. This standard provides the requirements for Rockwell hardness machines and the procedures for performing Rockwell hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Rockwell Hardness Testing Machines	Annex A1
Rockwell Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Rockwell Indenters	Annex A3
Standardization of Rockwell Hardness Test Blocks	Annex A4
Guidelines for Determining the Minimum Thickness of a Test Piece	Annex A5
Hardness Value Corrections When Testing on Convex Cylindrical Surfaces	Annex A6

1.3 This standard includes nonmandatory information in appendixes which relates to the Rockwell hardness test.

List of ASTM Standards Giving Hardness Values Corresponding to Tensile Strength	Appendix X1
Examples of Procedures for Determining Rockwell Hardness Uncertainty	Appendix X2

1.4 *Units*—At the time the Rockwell hardness test was developed, the force levels were specified in units of kilograms-force (kgf) and the indenter ball diameters were specified in units of inches (in.). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in millimeters (mm). However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in kgf units and ball diameters in inch units are provided for information and much of the discussion in this standard refers to these units.

1.5 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Rockwell and

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved Feb. 1, 2015. Published March 2015. Originally approved in 1932. Last previous edition approved in 2014 as E18 – 14a. DOI: 10.1520/E0018-15.

² In this test method, the term Rockwell refers to an internationally recognized type of indentation hardness test as defined in Section 3, and not to the hardness testing equipment of a particular manufacturer.

Rockwell superficial hardness tests. The significant differences between the two tests are that the test forces are smaller for the Rockwell superficial test than for the Rockwell test. The same type and size indenters may be used for either test, depending on the scale being employed. Accordingly, throughout this standard, the term Rockwell will imply both Rockwell and Rockwell superficial unless stated otherwise.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- A623 Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- A623M Specification for Tin Mill Products, General Requirements [Metric]
- B19 Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks
- B36/B36M Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B96/B96M Specification for Copper-Silicon Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar for General Purposes and Pressure Vessels
- B103/B103M Specification for Phosphor Bronze Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B121/B121M Specification for Leaded Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B122/B122M Specification for Copper-Nickel-Tin Alloy, Copper-Nickel-Zinc Alloy (Nickel Silver), and Copper-Nickel Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B130 Specification for Commercial Bronze Strip for Bullet Jackets
- B134/B134M Specification for Brass Wire

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard



- B152/B152M Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar
- B370 Specification for Copper Sheet and Strip for Building Construction
- E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
- E92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials (Withdrawn 2010)⁴
- E140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness
- E384 Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials
- E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- 2.2 *American Bearings Manufacturer Association Standard:*
ABMA 10-1989 Metal Balls⁵
- 2.3 *ISO Standards:*
ISO 6508-1 Metallic Materials—Rockwell Hardness Test—Part 1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)⁶
- ISO/IEC 17011 Conformity Assessment—General Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies⁶
- ISO/IEC 17025 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories⁶
- 2.4 *Society of Automotive Engineers (SAE) Standard:*
SAE J417 Hardness Tests and Hardness Number Conversions⁷

3. Terminology and Equations

- 3.1 *Definitions:*
 - 3.1.1 *calibration*—determination of the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.
 - 3.1.2 *verification*—checking or testing to assure conformance with the specification.
 - 3.1.3 *standardization*—to bring in conformance to a known standard through verification or calibration.
 - 3.1.4 *Rockwell hardness test*—an indentation hardness test using a verified machine to force a diamond spheroconical indenter or tungsten carbide (or steel) ball indenter, under specified conditions, into the surface of the material under test, and to measure the difference in depth of the indentation as the force on the indenter is increased from a specified preliminary test force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.5 *Rockwell superficial hardness test*—same as the Rockwell hardness test except that smaller preliminary and total test forces are used with a shorter depth scale.

3.1.6 *Rockwell hardness number*—a number derived from the net increase in the depth of indentation as the force on an indenter is increased from a specified preliminary test force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.7 *Rockwell hardness machine*—a machine capable of performing a Rockwell hardness test and/or a Rockwell superficial hardness test and displaying the resulting Rockwell hardness number.

3.1.7.1 *Rockwell hardness testing machine*—a Rockwell hardness machine used for general testing purposes.

3.1.7.2 *Rockwell hardness standardizing machine*—a Rockwell hardness machine used for the standardization of Rockwell hardness indenters, and for the standardization of Rockwell hardness test blocks. The standardizing machine differs from a regular Rockwell hardness testing machine by having tighter tolerances on certain parameters.

3.2 *Equations:*

3.2.1 The average \bar{H} of a set of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n is calculated as:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \tag{1}$$

3.2.2 The error E in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, relative to a standardized scale, is determined as:

$$E = \bar{H} - H_{STD} \tag{2}$$

where:

- \bar{H} = average of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n made on a standardized test block as part of a performance verification, and
- H_{STD} = certified average hardness value of the standardized test block.

3.2.3 The *repeatability* R in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, under the particular verification conditions, is estimated by the range of n hardness measurements made on a standardized test block as part of a performance verification, defined as:

$$R = H_{max} - H_{min} \tag{3}$$

where:

- H_{max} = highest hardness value, and
- H_{min} = lowest hardness value.

4. Significance and Use

4.1 The Rockwell hardness test is an empirical indentation hardness test that can provide useful information about metallic materials. This information may correlate to tensile strength, wear resistance, ductility, and other physical characteristics of metallic materials, and may be useful in quality control and selection of materials.

⁴The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

⁵Available from American Bearing Manufacturers Association (ABMA), 2025 M Street, NW, Suite 800, Washington, DC 20036.

⁶Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

⁷Available from Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096-0001, <http://www.sae.org>.

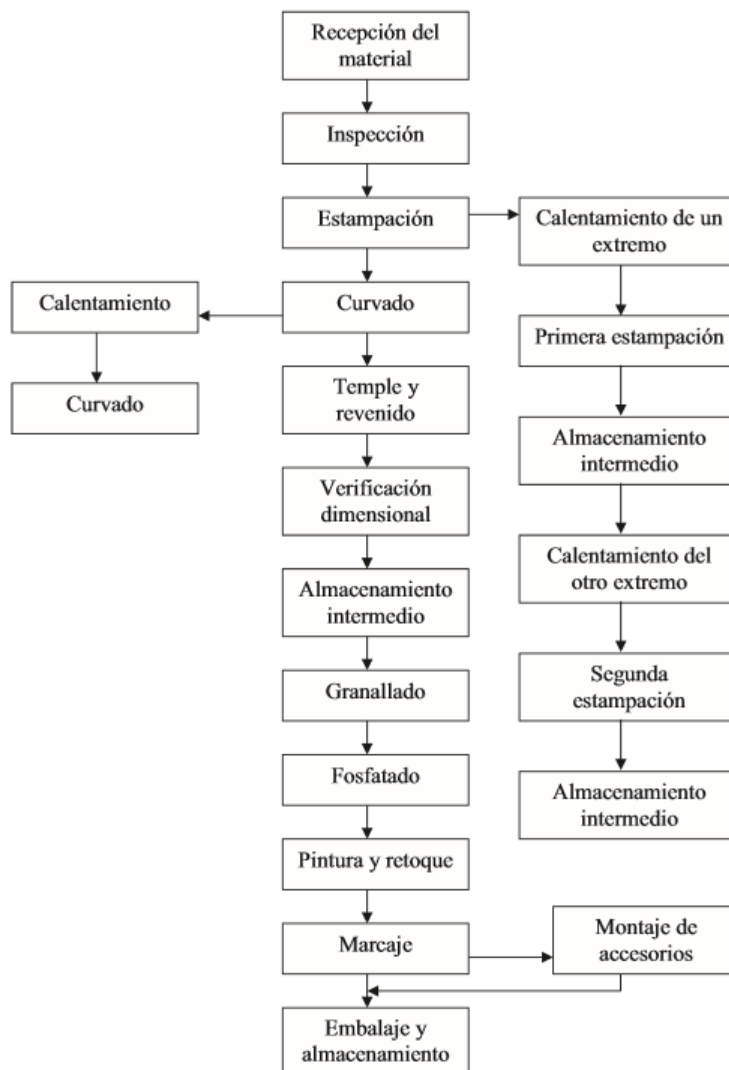
Anexo I

Análisis Económico.

Línea para la fabricación de barras estabilizadoras

Existen planteas en el país que ya se dedican a producir ciertos elementos automotrices como guardachoques, baldes para camionetas, escapes y otras autopartes, podrían optar por la diversificación de sus productos fabricando barras estabilizadoras.

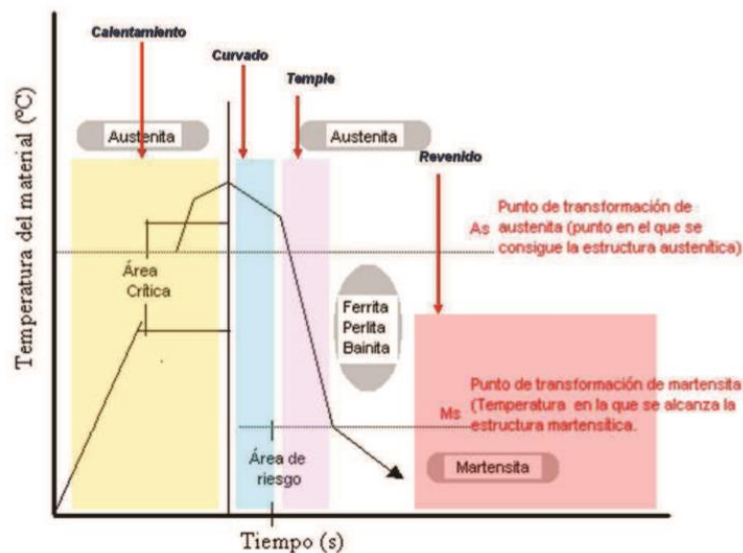
A continuación, se presenta el esquema de operaciones necesarias para producir barras estabilizadoras.



Fuente: (Paula Pérez Fernández, 2013)

Por lo tanto para implementar una línea para la fabricación de barras estabilizadoras, se requiere el equipamiento mínimo siguiente:

1. Una forja para estampar los extremos.
2. Un taladro para agujerear los extremos
3. Un sistema de calentamiento por inducción de 5 a 30 KHz para calentar las barras para el temple, doblado y revenido.
4. Una prensa para el doblado de las barras en caliente.
5. Una granalladora para limpiar el óxido de las barras luego del calentamiento.
6. Una tina y sustancias para el fosfatado
7. Un compresor y sus accesorios para el pintado
8. Material para la limpieza



En la figura, se puede observar el ciclo térmico al que es sometida la barra durante el proceso.

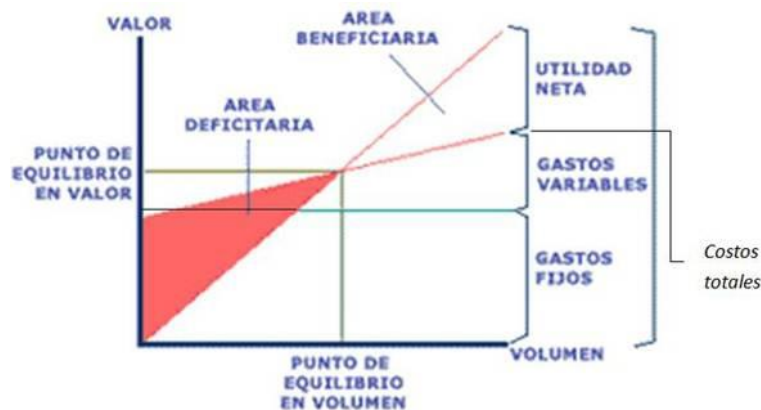
Considerando que una empresa cuenta con la mayoría del equipamiento necesario, se estima una inversión adicional de 15000,00 dólares, para empezar esta producción.

Para verificar la rentabilidad de esta línea de producción, se determina el punto de equilibrio (PE) mediante la siguiente ecuación.

$$PE = \frac{CF}{PV - CV}$$

Donde PE = Punto de equilibrio
 CF = Costos fijos totales
 PV = Precio de venta unitario
 CV = Costo variable unitario

Para entender mejor el significado de punto de equilibrio, en la siguiente figura, se puede observar su representación.



Punto de equilibrio (PE), para determinar el número de unidades al mes

CF = 15000,00 dólares

CV = 70 dólares.

En el costo variable (CV), está incluido el valor de la barra de acero (2 m de barra de 18 mm a un costo de 40 dólares), el valor del proceso sobre cada barra (20 dólares) y otros materiales utilizado (10 dólares).

PV = Costo unitario + Margen ganancia (30 %) = 70 + 21 = 91

PV = 91 dólares

$$PE = \frac{15000,00}{91 - 70} = 714,28 \text{ barras}$$

Si se vende más de 714,28 unidades, existe utilidad y se puede mantener el precio de 91 dólares propuesto, en el mercado nacional la Chevrolet vende cada barra importada a un precio de 120 dólares.

Punto de equilibrio (PE) en dólares

$$PE = \frac{CF}{1 - \frac{CV}{PV}}$$

$$PE = \frac{15000,00}{1 - \frac{70}{91}} = 65000,00 \text{ dolares}$$

Es lo que se debe vender como mínimo para que el proyecto sea rentable.

Si se vende, por ejemplo 2000 barras estabilizadoras, la utilidad será de

Utilidad = (2000x91)- (2000x70)-15000,00 =27000,00 dólares, que sobrepasa la inversión inicial.

Anexo J

Acabado superficial	Factor <i>a</i>		Exponente <i>b</i>
	<i>S_{UT}</i> , kpsi	<i>S_{UT}</i> , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

De C. J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3. núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horger (ed.), *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright © 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$