



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO

ESCUELA SUPERIOR DE CD. SAHAGÚN



ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y METALÚRGICAS DE
UN ACERO DE MEDIO CARBONO MICROALEADO (V+Ti) PARA SU
APLICACIÓN EN PIEZAS AUTOMOTRICES

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA
MARICELA HERNÁNDEZ CORDERO

ASESOR
DR. JORGE ZUNO SILVA

COASESOR
DR. EDGAR CARDOSO LEGORRETA
DR. MARTÍN ORTÍZ DOMÍNGUEZ

Marzo 2019

DEDICATORIA

A mi madre y hermanos por apoyo su apoyo incondicional, los consejos y sus palabras de aliento para nunca rendirme; y así conseguir mis metas.

Quiero agradecer a mi esposo no solo por su ayuda y el apoyo que me brindo para poder terminar mi tesis, sino también por querer lo mejor para mi porvenir y el de nuestra hija; son mi inspiración y mi motivación para seguir preparándome día a día.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de conocer personas maravillosas a lo largo de mi carrera, las cuales han aportado aspectos positivos en mi formación profesional y personal. También, por todo lo brindado a lo largo de mi vida que me ha hecho ser la persona que soy.

A mi asesor Dr. Jorge Zuno Silva por sus consejos, exigencia, por el conocimiento brindado a lo largo de este proyecto, por su amistad, su apoyo, y confianza para ser una mejor profesionista y una mejor persona.

A la Ing. María Rafaela Mohedano Juárez por su amistad y su apoyo brindado durante toda mi carrera.

Al Dr. Miguel Ángel Flores Rentería y Dr. Carlos Ernesto Borja Soto por su apoyo y consejos durante la elaboración del presente proyecto.

A los co-asesores el Dr. Edgar Cardoso Legorreta, Dr. Martín Ortiz Domínguez por las observaciones al proyecto, las cuales fueron de utilidad para el mejoramiento del mismo.

A mis maestros quienes compartieron sus conocimientos a lo largo de mi carrera en especial al Ing. Martin Ortiz Granillo por su motivación y amistad para mi formación profesional, desde el momento que ingrese a mi casa de estudios.

ÍNDICE

RESUMEN.....	X
Abstract.	X
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes	1
Problemática	4
Solución propuesta	5
Justificación	5
OBJETIVOS	7
Objetivo general:	7
Objetivos específicos	7
Alcances	8
Limitaciones	8
CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	9
1.1 Acero (Definición)	9
1.2 Clasificación de aceros	9
1.3 Cigüeñales	20
CAPÍTULO II. EXPERIMENTACIÓN	33
2.1 Diagrama de flujo	33
2.2.1 Materias primas	34
2.2.2 Cálculo de carga para la obtención de aleaciones	35
2.3 Preparación de equipo de fundición	38
2.3.1 Construcción del molde cilíndrico y cuchara	38
2.3.2 Preparación del material y colada.....	44
2.4 Fabricación del material	46
2.4.1 Solidificación.....	55
2.4.2 Desmoldeo	56
2.5 Procesamiento del material	57
2.5.1 Maquinado de lingotes.....	57
2.5.2 Obtención de probetas	58
2.6 Caracterización metalográfica y tratamientos térmicos	59
2.7 Preparación para el análisis metalográfico	61

2.8 Ensayos mecánicos.....	63
2.8.1 Ensayos de tracción.....	63
2.8.2 Dureza.....	66
2.8.3 Ensayo de fatiga	67
2.8.4 Ensayo de impacto.....	68
CAPÍTULO III RESULTADOS	69
 3.1.- Análisis químico y metalográfico de los aceros fundidos tipo 38MnV11+Ca y un lote de acero titular (38MnVS) para certificar calidad.	69
3.2 Análisis metalográfico	72
 3.3. Tratamiento térmico de homogenización	87
 3.4 Manufactura de lingotes como materia prima en dimensiones para forja industrial	91
 3.5.- Maquinado de probetas para ensayos mecánicos para determinar la calidad y desempeño de cigüeñales forjados con aceros tipo 38MnV11+Ti	95
 3.6. Estudios de fractografía en muestras de tensión, fatiga y charpy para determinar el modo de falla.....	100
CAPITULO V CONCLUSIONES	114
REFERENCIAS	115
Referencias Bibliográficas.....	115
Referencias imágenes.....	117
Referencia de tablas.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de vehículos [1]	3
Figura 2 Diagrama de fabricación de aceros tipo 38MnVS <u>con rolado en caliente</u>	6
Figura 3 Diagrama de fabricación de aceros tipo 38MnVS <u>sin rolado en caliente</u>	6
Figura 4 Diagrama global de formabilidad [3, 5,10]	10
Figura 5 Evolución de resistencia de los aceros [3,5].	10
Figura 6 Microestructura de un acero BH con presencia de carbonos y nitrógenos libres en solución solida dentro de la matriz ferrítica [3].	12
Figura 7 Micrografía de un acero de doble fase [3].	16
Figura 8 Micrografías de un acero TRIP [3].	16
Figura 9 Ejes de una transmisión [6]	19
Figura 10 Cigüeñal de un automóvil	20
Figura 11 Funcionamiento de un cigüeñal	21
Figura 12 Partes de un motor.	21
Figura 13 Carrocería de un automóvil [2].	30
Figura 14 Materiales del sector automotriz [3]	31
Figura 15 Aplicación en el sector automotriz [3].	32
Figura 16 Elementos aleantes que se adicionaron al material base.	35
Figura 17 Material para el ajuste del contenido de carbono.	37
Figura 18 Preparación del equipo para la fundición.	38
Figura 19 Diseño estructural del molde para el material fundido.	39
Figura 20 Diseño de la cucharilla para análisis químico.	40
Figura 21 Soldadura de placa de acero de 25 mm para direccionar la solidificación.	40
Figura 22 Introducción del tubo de menor espesor en la lingotera.	41
Figura 23 Encamisado de la lingotera de acero para obtener un diámetro de 9.6 cm y acelerar el efecto chill.	42
Figura 24 Corte en sierra cinta de las palanquillas de acero.	42
Figura 25 Materia prima de palanquilla de acero seleccionada para la fundición del acero 38MnVS.	43
Figura 26 Lingotera con lana térmica para reducir el rechape.	43
Figura 27 Material Sorel para el ajuste del contenido de carbono.	44
Figura 28 Limpieza de la palanquilla de acero	44
Figura 29 Sorel (arrabio) y palanquilla de acero limpios.	45
Figura 30 Proceso de vaciado del acero.	45
Figura 31 Técnica de vaciado de metal alrededor de 1700°C.	46
Figura 32 Horno de inducción de 50 kg de capacidad, utilizado para la fusión de aleaciones de hierro.	47
Figura 33 Colocación de palanquilla dentro del crisol.	47
Figura 34 Control de potencia del horno.	48
Figura 35 Inicio de la fusión de la palanquilla de acero.	49
Figura 36 Metal fundido en un 80%.	49

Figura 37 Material para el ajuste del contenido de carbono.....	49
Figura 38 Metal fundido con presencia de oxidación.	50
Figura 39 Metal fundido desoxidado con aluminio.....	50
Figura 40 Adición de elementos aleantes.	51
Figura 41 Adición de elementos micro-aleantes.	51
Figura 42 Monitoreo de la temperatura con un termopar.....	52
Figura 43 Vaciado del material en las lingoteras.....	53
Figura 44 Reducción del rechuve a través de arena sílica.	54
Figura 45 Muestra para análisis químico.....	54
Figura 46 Solidificación del metal en lingotera metálica.....	55
Figura 47 Lingotera con mazarota y colcha refractaria al término del proceso de solidificación.	56
Figura 48 Lingote fundido y listo para ser maquinado a las dimensiones de forja.	57
Figura 49 Proceso de maquinado de los lingotes.	57
Figura 50 Lingote maquinado y preparado para ser forjado.	58
Figura 51 Imagen esquemática del seccionamiento para obtención de probetas.	59
Figura 52 Zonas para toma de micrografías de todas las muestras.	60
Figura 53 Mufla Furnace 1400 para tratamientos térmicos.....	61
Figura 54 Pulidora metalográfica para la preparación de probetas.	62
Figura 55 Microscopio óptico y equipo para análisis metalográfico.	63
Figura 56 Grafica obtenida del ensayo de tracción (tensión- deformación).	64
Figura 57 Maquina servo hidráulica para ensayos mecánicos.....	65
Figura 58 Probetas normalizadas para ensayos de tensión.....	65
Figura 59 Durómetro Emco-Test para ensayos de dureza.....	67
Figura 60 Mapeo de una sección del lingote de acero MnV11S+Ca.....	73
Figura 61 Microestructura conformada por ferrita – perlita del acero en estado de colada.....	74
Figura 62 Microestructura del acero en estado de colada, se observan granos columnares	74
Figura 63 Fase Perlita del acero en estado de colada, se observan dos inclusiones embebidas en la fase.	75
Figura 64 Análisis por EDS de un aluminato (spectrum 7) y de una inclusión de MnS (spectrum 8) encontradas en la Perlita del acero en estado de colada.....	76
Figura 65 Fase Perlita - Ferrita del acero en estado de colada, se aplicó un EDS – line scan en cada fase.....	77
Figura 66 EDS – line scan aplicado en la fase ferrita del acero en estado de colada.	77
Figura 67 EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada....	78
Figura 68 EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada....	79
Figura 69 . EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada..	80
Figura 70 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase	81
Figura 71 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.....	82
Figura 72 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.....	83

Figura 73 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.....	84
Figura 74 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.....	85
Figura 75 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.....	86
Figura 76 Tratamiento térmico de homogenización con deformación en la zona ferrita – perlita aplicada a los aceros colados.	87
Figura 77 Cambio microestructural del acero colado a 900°C.....	88
Figura 78 Microestructura de acero 38MnV11S+Ti forjado, Ferrita-Perlita.....	88
Figura 79 Inclusión compleja en fase Ferrita del acero 38MnV11S+Ti forjado	89
Figura 80 EDS - Inclusión compleja en fase Ferrita del acero 38MnV11S+Ca forjado ...	90
Figura 81 Presencia de VC +TiC en la matriz ferrítica de los aceros colados 38MnV11S+Ca.....	91
Figura 82 Fundición y corte de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	92
Figura 83 Corte y extracción de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	93
Figura 84 Corte y extracción de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	93
Figura 85 Maquinado burdo de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	94
Figura 86 Maquinado burdo de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	94
Figura 87 Maquinado fino y de ajuste a medida de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ca	95
Figura 88 Maquinado final de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti	95
Figura 89 Corte de cigüeñal para el maquinado de probetas de tensión, Charpy y fatiga de acero forjado 38MnV11S+Ti.....	96
Figura 90 Probetas para ensayo de fatiga de aceros forjados 38MnV11S+Ti	97
Figura 91 Probetas para ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ti	97
Figura 92 Ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ti	98
Figura 93 Maquinado de probetas para ensayo Charpy de aceros forjados 38MnV11S+Ti.....	98
Figura 94 Vista general de la fractura del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca	102
Figura 95 Presencia en grano de ferrita de inclusiones tipo MnS de forma alargada del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca.....	102
Figura 96 Presencia en grano de ferrita de inclusiones tipo MnS de forma globular (señaladas) y alargada del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca.....	103
Figura 97 EDS de las inclusiones encontradas en fractografía del ensayo de tensión de los aceros forjados 38MnV11S+Ca.....	103
Figura 98 Inclusión compleja formada por O ₂ , Si, Al, Ca, Mn y S - acero forjado 38MnV11S+Ca.....	104
Figura 99 . EDS de la inclusión compleja formada por O ₂ , Si, Al, Ca, Mn y S - acero forjado 38MnV11S+Ca.....	104
Figura 100 Inclusión compleja formada por O ₂ , Si, Al, Ca, Mn y S – acero forjado 38MnV11S+Ti.....	105
Figura 101 Inicio de la fractura en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti.....	106

Figura 102 Fractura intra-granular en la probeta del ensayo de fatiga – acero forjado 38MnV11S+Ti.....	106
Figura 103 Sentido de la propagación de la fractura en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti.....	107
Figura 104 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti.....	107
Figura 105 . Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti.....	108
Figura 106 EDS de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	108
Figura 107 Fractura de la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	109
Figura 108 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo Charpy.....	109
Figura 109 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo Charpy acero forjado 38MnV11S+Ti ..	110
Figura 110 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	110
Figura 111 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	111
Figura 112 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	111
Figura 113 Presencia de inclusiones tipo MnS+Ca de forma globular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	112
Figura 114 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular y fractura por clivaje en un grano de ferrita - acero forjado 38MnV11S+Ti ..	112
Figura 115 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular y fractura por clivaje en un ..	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 Tipos de aceros y su límite elástico.	15
Tabla 3 Tipos de aceros y algunas de sus propiedades.	18
Tabla 4 Propiedades mecánicas de un cigüeñal.	22
Tabla 5 Aceros aleados utilizados en la manufactura de cigüeñales.	23
Tabla 6 Normas para la fabricación de transmisiones.	23
Tabla 7 Propiedades mecánicas de los principales aceros para la fabricación de transmisiones.	25
Tabla 8 Composición Química de aceros utilizados para transmisiones.	28
Tabla 9 Composición química de la materia prima.	34
Tabla 10 Composición química base.	36
Tabla 11 Ajuste de contenidos de elementos aleantes.	37
Tabla 12 Resultados Promedio de los análisis químicos de los aceros fundidos	70
Tabla 13 Resultados de los análisis químicos de los aceros fundidos.	71
Tabla 14 Fases presentes, tamaño de grano, inclusiones y precipitados de los aceros colados y titular	91
Tabla 15 Resultados del ensayo de Tensión	99
Tabla 16 Resultados del ensayo de Fatiga	99
Tabla 17 Resultados del ensayo de Charpy	100

RESUMEN

En México existen 21 armadoras distribuidas en catorce estados del país, pues en los últimos 10 años los avances tecnológicos en aceros han logrado reducir un 25 % el peso de los automóviles (y en algunos casos hasta un 29 %), esto implica un rediseño en sus componentes y procesos de fabricación lo que permite fabricar piezas automotrices con secciones más delgadas, volviéndolo un reto tecnológico el desarrollo de componentes en especial los del tren motriz y de manera particular el cigüeñal y que sean perfectamente funcionales con los nuevos requerimientos de operación.

Para esto se requiere de un acero con un espesor menor al utilizado en los cigüeñales actuales pero con una alta resistencia mecánica, para ello se requiere del estudio y fabricación por fundición de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de un acero tipo 38MnVS variando sus contenidos de vanadio (0.08 % wt-1.12 % wt) y de titanio (0.04% wt- 0.08% wt) en estado de colada puesto que la variación del vanadio controla la resistencia a la atension y dureza lo que nos permite la optimización de la fabricación de cigüeñales reduciendo el peso de los vehículos y teniendo un ahorro de combustible.

Abstract

In Mexico there are 21 assemblers distributed in fourteen states of the country, because in the last 10 years technological advances in steel have managed to reduce the weight of automobiles by 25% (and in some cases up to 29%), this implies a redesign in Its components and manufacturing processes allow manufacturing automotive parts with thinner sections, making it a technological challenge the development of components especially those of the powertrain and particularly the crankshaft and that are perfectly functional with the new operating requirements.

This requires a steel with a thickness less than that used in the current crankshafts but with a high mechanical resistance, for it requires the study and manufacture by casting the mechanical and metallurgical properties of a steel type 38MnVS varying its vanadium contents (0.08% wt-1.12% wt) and titanium (0.04% wt- 0.08% wt) in cast state since the variation of vanadium controls the resistance to stress and hardness which allows us to optimize the manufacture of crankshafts reducing the weight of the vehicles and having a saving of fuel.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En los últimos 20 años, México se ha convertido en un país altamente competitivo para la industria automotriz, la cual es considerada como el segundo sector más productivo en la económica del país. Lo anterior, genera un importante desarrollo económico con una alta generación de empleos, y que, a su vez, demanda personal calificado, modernización tecnológica y la utilización de nuevos materiales, de manera particular, aceros avanzados de alta resistencia (38MnVS+Ti) microaleados para la manufactura de piezas automotrices.

El desarrollo automotriz en nuestro país comienza a sobresalir con la aparición del primer decreto en 1962, pero desde 1925 ya se fabricaban automóviles en el país [1]. La ubicación geográfica del país es favorable para las empresas norteamericanas, europeas y asiáticas; las cuales destacan desde el inicio de la industria automotriz y en el transcurso de su evolución de la misma. De acuerdo con A. Vicencio [1], en el desarrollo de la industria automotriz en México han destacado seis fases:

- I. Nacimiento de la industria e inicio de operaciones (1925–1960).
- II. Enfoque orientado hacia la competitividad internacional a través de la protección comercial y promoción de las exportaciones (1977–1989).
- III. Crecimiento basado en la sustitución de importaciones (1962–1976).
- IV. El principio de la liberalización comercial (1990–1993)
- V. El tratado de libre comercio y la liberalización paulatina de la industria automotriz
- VI. Enfoque moderno hacia el fortalecimiento de la competitividad y desarrollo del mercado interno.

La generación de empleo por parte del sector automotriz en México, ha ido en aumento de acuerdo a los estudios realizados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y la Secretaría de Economía (SE). En el año de 2005 la industria automotriz generaba el 1.6 % del total de empleos del país (488,900) y el 18 % de empleos en el sector manufacturero [1]. Los datos de la SE correspondientes al año 2013, indican que en la industria automotriz 520,860 empleos fueron generados por los fabricantes de partes y 66,668 por parte de las plantas ensambladoras. Estos se ubicaron entre los empleos mejor remunerados de la industria manufacturera con el 21.6 % y el 19 %, respectivamente [2].

Actualmente, el sector automotriz aporta más de 3 % del producto interno bruto (PIB) nacional y 18% del PIB manufacturero. Dicha industria genera divisas por más de 52,000 millones de dólares al año y genera 900,000 empleos directos en todo el país, aproximadamente. De acuerdo a lo mencionado, México es el séptimo productor y el cuarto exportador de vehículos ligeros a nivel mundial [3].

En México existen 21 armadoras distribuidas en catorce estados del país, en la figura 1 se muestran algunas de las de estas así como los diferentes modelos de autos que fabrican [3,4].

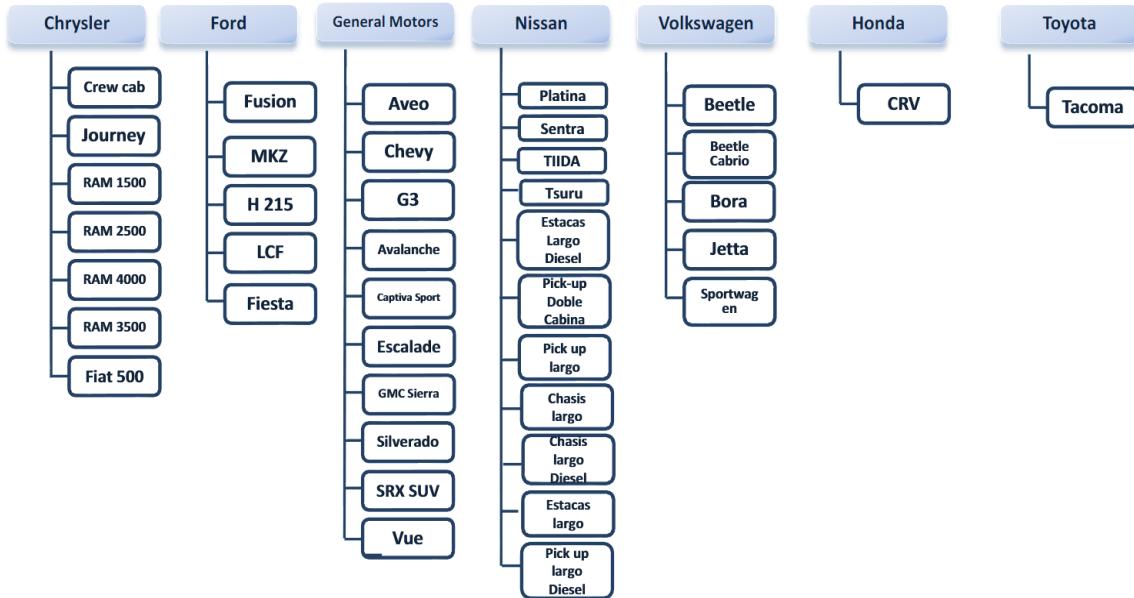


Figura 1 Tipos de vehículos [1].

En los últimos 10 años los avances tecnológicos en aceros han logrado reducir un 25 % el peso de los automóviles (y en algunos casos hasta un 29 %), mejorando el rendimiento de combustible [12]. Los aceros avanzados en travesaños, refuerzos interiores de puertas y en los refuerzos del motor [6]. Esta reducción en peso se ha logrado utilizando aceros avanzados de ultra alta resistencia (> 1000 Mpa), lo que permite fabricar piezas automotrices con secciones más delgadas, pero con una alta resistencia mecánica y una extraordinaria rigidez lo que evita cualquier doblez o flexión del material.

Problemática

En la industria automotriz, se ha generado un auge estratégico para la producción de motores a gasolina y/o híbridos (gasolina – eléctrico) para autos subcompactos con bajos consumos de combustible y un alto rendimiento mecánico. Esto es posible mediante la combinación de tres tecnologías [1]: **1)** la incorporación de turboalimentación con lo cual se mejora el rendimiento y la entrega de potencia al mismo tiempo, **2)** control electrónico de aceleración y control de apertura de válvulas variable con inyección de combustible multipunto y **3) disminución de volumen desplazado en el cilindraje.** *Esto implica un rediseño en sus componentes y procesos de fabricación.* Referente a la **disminución de volumen desplazado en el cilindraje:** estos motores son capaces de entregar mayores potencias que los motores convencionales a más bajas revoluciones; es decir, 148 Lb-ft @ 2500 RPM [2] en contraste con las 114 Lb-ft @ 4000 RPM [3] de una versión con motor convencional sin sacrificar o incluso mejorando el consumo de combustible, **lo que implica una reducción del tamaño de motor y un reto tecnológico para desarrollar componentes, en especial los del tren motriz y de manera particular el cigüeñal, que sean perfectamente funcionales con los nuevos requerimientos de operación, para esto se requiere de un acero capaz de entregar un torque alto con dimensiones y espesores menores a los utilizados en los cigüeñales actuales.**

Solución propuesta

Fabricación por fundición de un acero tipo 38MnVS con variaciones en sus contenidos de vanadio (0.08%wt - 1.12%wt) y titanio (0.04%wt – 0.08%wt). Así también se utilizó un enfriamiento rápido en lingoteras metálicas para reducir la longitud de los granos dendríticos y analizar sus propiedades mecánicas en estado de colada. Con la adición de vanadio en diferentes cantidades se controla la resistencia a la tensión y dureza lo cual permite a los diseñadores de vehículos optimizar la fabricación de cigüeñales con formas más complejas y espesores menores lo que favorece reducir el peso de los vehículos y como consecuencia el ahorro en combustible. La documentación del proceso de fundición es importante para poder ser replicado a nivel industrial.

Justificación

Desde el punto de vista productivo, los procesos industriales buscan la ruta optima y económica para fabricar la mayor cantidad de productos con la mejor calidad. En el caso de piezas automotrices como lo es el cigüeñal, es necesario diseñar un proceso industrial que permita obtener la materia prima para su fabricación en condiciones metalúrgicas que reduzcan su procesamiento, es decir, un proceso alterno que elimine el rolado en caliente de las barras utilizadas para la forja de cigüeñales con aceros tipo 38MnVS, ver Figura 2. En este aspecto, es necesario obtener una microestructura de colada con la mínima formación de granos dendríticos tipo columnar y reforzar las propiedades mecánicas con la adición de elementos endurecedores por precipitación como lo es el vanadio y el titanio. De esta forma, se pueden fabricar los lingotes a la medida que se requiera y se asegura una tenacidad favorable con la innovación en la composición química del acero y eliminando el proceso de rolado en caliente, ver Figura 3. Bajo esta perspectiva, se hace necesario diseñar un proceso de fundición que pueda ser escalable a nivel industrial, y el cual es descrito en la sección de desarrollo experimental.

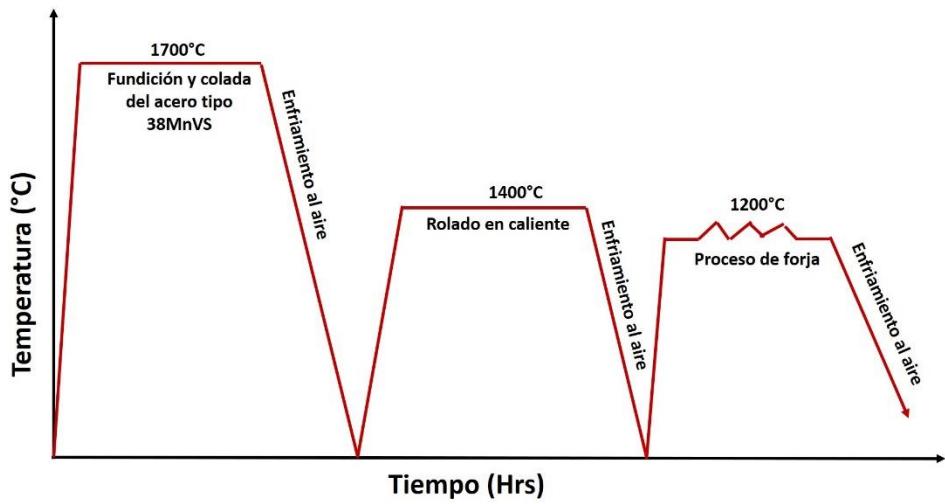


Figura 2 Diagrama de fabricación de aceros tipo 38MnVS con rolado en caliente

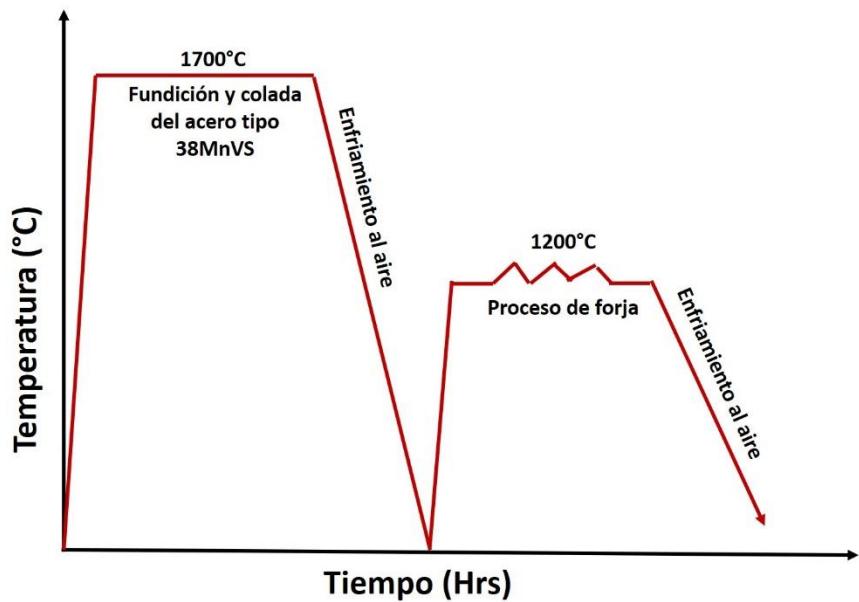


Figura 3 Diagrama de fabricación de aceros tipo 38MnVS sin rolado en caliente

OBJETIVOS

Objetivo general:

Estudiar las propiedades mecánicas y metalúrgicas de un acero de medio carbono (tipo 38MnVS) microaleado con V + Ti fabricado por fundición a nivel experimental mediante ensayos mecánicos de tensión, dureza, desgaste y microestructurales en estado de colada; para determinar su potencial de aplicación en piezas de transmisión automotriz (cigüeñales).

Objetivos específicos

- Determinar la composición química optima del acero de medio carbono mediante el análisis de aceros utilizados en la forja de cigüeñales para estimar los contenidos de elementos aleantes como el V + Ti.
- Desarrollar el proceso de fundición a nivel laboratorio mediante la fijación de acciones como el cálculo de carga, limpieza de chatarra y demás para reproducir de manera sistemática y controlada el proceso de fundición.
- Especificar los rangos de resistencia a la tensión, cedencia y elongación y demás parámetros mediante normas y estándares internacionales para evaluar el efecto del proceso de fabricación del acero y la adición de los elementos microaleantes como el vanadio y el titanio.

Alcances

- La investigación se enfocó a las empresas dedicadas al rubro de la industria automotriz en México.
- La mejora y evolución que han tenido los materiales con los cuales se fabrica los automóviles, el desarrollo de nuevos materiales que ayuden al cuidado del medio ambiente.
- El estudio de diversos aceros y sus propiedades tanto físicas como metalúrgicas para ser usadas en las transmisiones automotrices.

Limitaciones

- La búsqueda de mejorar las propiedades mecánicas de un acero microaleado con vanadio + titanio para una mejor optimización en el ámbito automotriz, esto debido a que es una innovación propia y los trabajos de investigación referente a este tema aún están a nivel experimental o como secreto industrial.
- Recopilar más información acerca de aceros de medio carbono con las características mecánicas y metalúrgicas que son usados en las transmisiones automotrices, así como el poder mejorarlas reduciendo el peso de un automóvil que es lo que hoy en día buscan las grandes industrias dedicadas a este sector.

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Acero (Definición)

El acero es un metal muy fuerte que está hecho principalmente de hierro, carbono y otros elementos en pequeñas cantidades. Se caracteriza por su gran resistencia. Un 92% de todo el acero es simple acero al carbono; el resto es acero aleado: aleaciones de hierro con carbono y otros elementos tales como magnesio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio, el acero se usa para hacer muchas cosas, por ejemplo puentes, edificios, vehículos y cubiertos [18-20].

1.2 Clasificación de aceros

Dentro de los tipos de acero podemos encontrar los aceros Avanzados de Alta Resistencia, por su siglas en inglés AHSS (aceros al Boro, aceros con alto límite elástico (por sus siglas en inglés: HSLA), aceros de doble fase (por sus siglas en inglés: DP), aceros de fase compleja (por sus siglas en inglés: CP), aceros de alto límite elástico (por sus siglas en inglés: UHL), aceros martensíticos (por sus siglas en inglés: MS), aceros con plasticidad inducida por transformación (por sus siglas en inglés: TRIP)) [6].

Estos metales son multifásicos es decir, que pueden contener ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas excepcionales. Se subdividen de acuerdo a dichas propiedades, considerando principalmente su resistencia y tenacidad, por lo cual se consideran los valores del último esfuerzo de tensión (por sus siglas en inglés: UTS), esfuerzo de cadencia (σ) y porcentaje de deformación (ε). Estas propiedades determinan las aplicaciones de dichos materiales [6].

En la figura 4, muestra un diagrama con la clasificación de dichos aceros de acuerdo a su alargamiento y tracción enfatizando el alargamiento en el eje "Y" y la resistencia a la tracción en el eje "X"; en la figura 5 la evolución de resistencia con respecto a esos aceros.

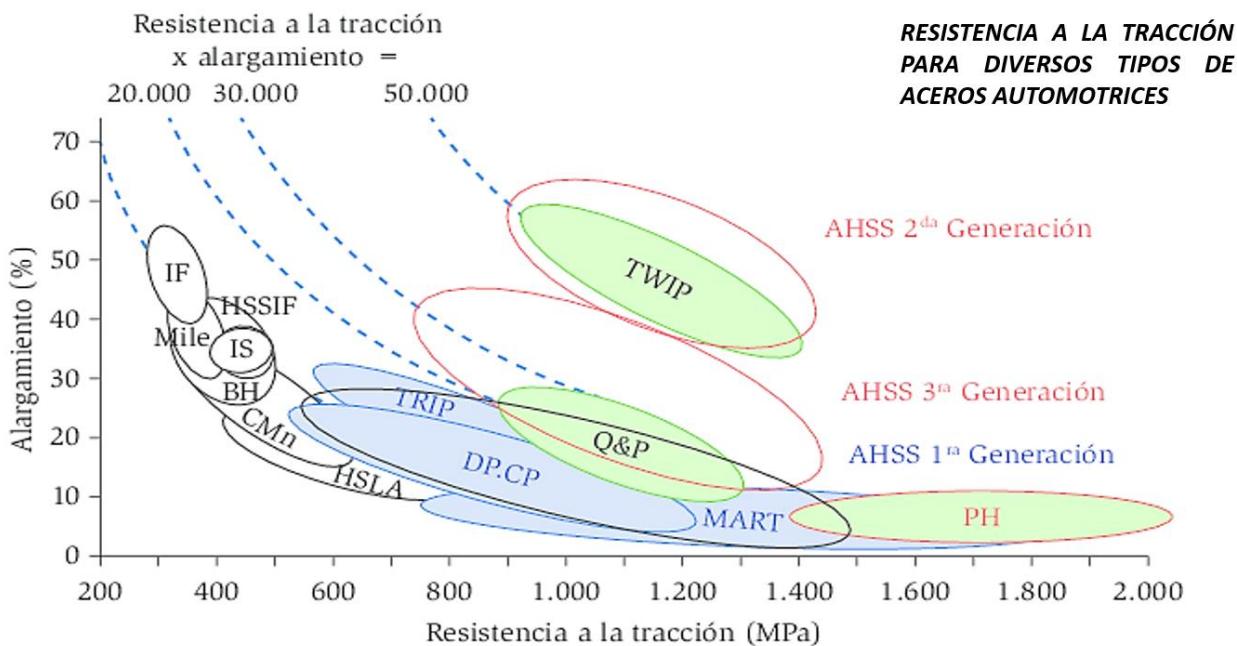


Figura 4 Diagrama global de formabilidad [3, 5,10]

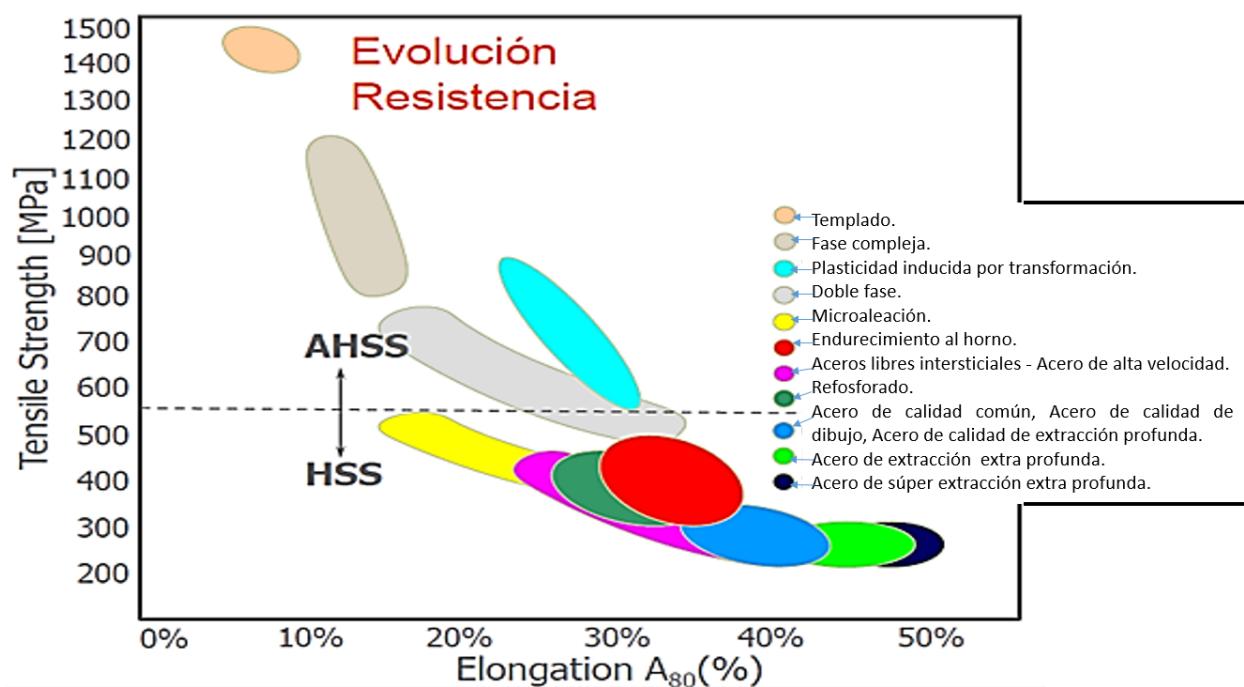


Figura 5 Evolución de resistencia de los aceros [3,5].

- HSS Presentan Límites Elásticos entre 210 y 550 MPa. Se trata de aceros monofásicos (normalmente ferríticos). Como principal ejemplo los aceros HSLA (High Strength Low Alloyed) con tratamientos de laminación termo mecánica.
- AHSS Presentan Límites Elásticos comprendido entre 450 MPa y 800 MPa, (normalmente son aceros multifase, pudiendo presentar ferrita /martensita /bainita /austenita retenida). Como ejemplos los Aceros TRIP, DP, CP y MS.
- Aceros de ultra alta resistencia (por su siglas en inglés: USSH), con un límite elástico superior a 800 N/mm² en donde se encontrarían los Aceros Martensíticos y los Aceros Boron.
- Otra clasificación del acero dada en el sector automotriz es:
 - I. Aceros de conformación en frío convencionales.
 - II. Aceros de alto, súper o ultra alto límite elástico o de alta resistencia (HSS).
 - III. Aceros laminados en caliente y decapados. [5]

El acero convencional o acero dulce, está formado por una microestructura simple ferrítica; es laminado en frío y con un bajo contenido en carbono y elementos mínimos de aleación lo cual proporciona unas buenas características para el trabajo de deformación en prensas, pero por el contrario su límite elástico es demasiado bajo, por lo que se necesitan mayores espesores para soportar los esfuerzos a los que se someten las distintas piezas, tienen un bajo costo y sirven de patrón de comparación con otros materiales.[7,11]

Aceros libre intersticiales (por sus siglas en inglés: IF) tienen una microestructura ferrítica y bajo contenido en carbono, se obtienen por el proceso de desgasificación al vacío, siendo su principal característica la carencia de átomos intersticiales en su estructura atómica; permitiendo una alta ductilidad, estos aceros son usados en productos de embutición profunda, en automóviles son empleados en la estructura del cuerpo y cierres [11].

Aceros de endurecimiento al horno (por sus siglas en inglés: BH) poseen microestructura ferrítica, estos aceros son tratamiento térmico a baja temperatura para conseguir un aumento significativo de su límite elástico, con la finalidad de incrementar su resistencia en comparación con los aceros dulces y los IF sin afectar su formabilidad. La ganancia en su límite elástico, es generalmente superior a 40 MPa. Este efecto ofrece una mejora en la resistencia a la deformación, una reducción del espesor y con frecuencia son seleccionados para paneles de cierre en puertas, capós y fascia [7,11].en la figura 6 podemos observar la microestructura de estos aceros con presencia de carbonos y nitrógenos libres.

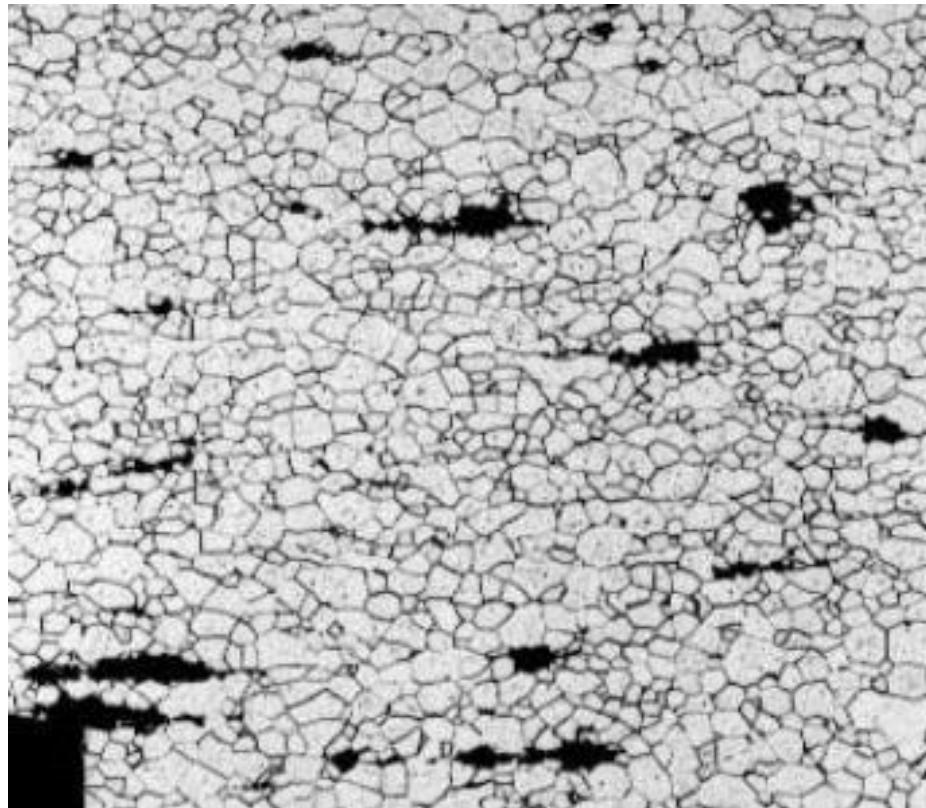


Figura 6 Microestructura de un acero BH con presencia de carbonos y nitrógenos libres en solución sólida dentro de la matriz ferrítica [3].

Los aceros HSLA tienen una matriz ferrítica con agregados de perlita y carburos de aleación finamente dispersos. Sus elementos microaleantes más comunes son V, Nb, Ti, los cuales favorecen la precipitación de la microaleación y pueden generarse microestructuras de cementita empleando Ti y enfriamientos rápidos; poseen mayor resistencia que los aceros dulces, Aceros libre intersticiales (iF) y Aceros endurecidos en horno (BH), son resistentes a la corrosión, conformables y soldables. Tales propiedades, hacen que estos aceros sean utilizados para estructura de la carrocería, componentes de suspensión y el chasis, así como los rines o ruedas de automóviles principalmente. [11]

Aceros Microaleados o Aceros ALE su obtención es mediante la reducción del tamaño de grano y precipitación del mismo, y según sea su aplicación se añaden otros elementos de aleación como Ti, Nb o Cr que dan propiedades de dureza. Se caracterizan por una buena resistencia a la fatiga, resistencia al choque y buena capacidad de deformación en frío [7].

Existen aceros con un bajo contenido en carbono <2%, como son los aceros de fase compleja (CP), su estructura está basada matriz ferrita y bainita con pequeñas cantidades de martensita y austenita retenida, sus aleantes más comunes son el Mn, Si, Mo, B, Cr y sus microaleantes para refinamiento de grano Ti y Nb. Estos aceros se caracterizan por su elevada absorción de energía acompañada de una alta resistencia a la deformación, se diferencian de los DF porque tienen mayor límite elástico pero una ruptura máxima de 800MPa, las piezas que se fabrican son autopartes del motor, maletero y aquellas que tienen que evitar la intrusión de elementos en la zona de pasajeros [7,11].

Aceros de Ultra Alta Resistencia (USSH) Este tipo de aceros se caracterizan por su alta rigidez, la absorción de grandes energías y su alta capacidad para no deformarse. Los usos más comunes son aquellos en los que se requiere una elevada capacidad de absorber energía sin que se deforme la pieza, un ejemplo sería el refuerzo en donde va el cinturón de seguridad (pilar B) [7]. Estos aceros son muy costosos y no tienen las propiedades mecánicas suficientes para resistir la fatiga e impactos por colisiones que se pueden generar en los componentes de un camión de pesado [11].

Los Aceros Martensíticos (MS) se caracterizan por la transformación de austenita-martensita con pequeñas fases de bainita y ferrita, su microestructura está compuesta básicamente de martensita, sus elementos aleantes Mn, Si, Cr, Mo, B, V y Ni, los cuales incrementan la templabilidad de estos aceros y la precipitación de carburos ricos en V durante el tratamiento de recocido da un refinamiento de grano así como la formación de austenita, mejorando su ductilidad y con el post-enfriamiento una mejor ductilidad. Presentando una resistencia de tensión de 900-1700 MPa pero con bajo porcentaje de elongación; utilizándose principalmente para el refuerzo del parachoques y puertas vigas de intrusión, las ampollas de umbrales y refuerzos, travesaño lateral y la línea del cinturón refuerzos, manantiales y clips [7,11].

Aceros al Boro o Aceros Boron son aceros que presentan un alto grado de dureza como resultado del tratamiento térmico al que son sometidos así como de la adición de elementos aleantes tales como Manganese (1,1 a 1,4 %), cromo y boro (0,005%). Gran parte de la dureza que poseen estos aceros es el resultado de la estructura martensítica que se obtiene de aplicar el tratamiento térmico y su microestructura es bainitica-martensitica. El principal efecto del boro en estos aceros es la inhibición de la nucleación de ferrita en el límite de grano de la austenita facilitando la formación de bainita y martensita, aumentando de esta manera la templabilidad del acero [7,11].

La tabla 1 nos muestra el rango del límite elástico de los tipos de aceros antes y después de su proceso de obtención [1].

Los aceros Doble fase (DP) consisten en una matriz ferrítica que contiene una fracción variable de fase martensítica de alta dureza. Esta fracción aumenta según sea la resistencia deseada, la fase ferrítica es continua, presentando una buena ductilidad así como una excelente distribución de deformaciones, haciéndolos con mayor resistencia a la tracción y a la fatiga que aceros convencionales pero con un límite elástico similar dando una buena capacidad de absorción de energía, también contienen un efecto BH siendo beneficioso para el peso en el vehículo [7,14].

Tabla 1 Tipos de aceros y su límite elástico.

Tipo de Acero	Rango Límite Elástico Re(N/mm)	Acero	Proceso de Obtención	Rango Límite Elástico Re(N/mm)
Aceros convencionales	<220			
Aceros de alta Resistencia	>220 <450	Bake Hardening	Bake Hardening	160-300
		Microaleado	Afino de grano y precipitación	>340
		Refosforado	Solución sólida	>220
Aceros de muy alta resistencia	>450 <800	Fase Doble (DP)	Fases duras	500-600
		TRIP	Fases duras	600-800
		Fase Compleja (CP)	Fases duras	800-1000
Aceros de ultra alta resistencia	>800	Martensíticos (Ms)	Fases duras	1000-1250
		Aceros al Boro	Fases duras	>1250

El carbono presente en este material permite la formación de martensita a velocidades de enfriamiento aceptables, debido a su efecto en la templabilidad del material proporcionando también un efecto endurecedor. Los elementos de Mn, Cr, Mo, V y Ni incorporados al material aumentan la templabilidad. A su vez, el tamaño de grano de la matriz ferrítica es otro de los parámetros que controlan el endurecimiento y la buena tenacidad de estos materiales. Estos aceros de última generación tienen su aplicación en partes estructurales para la industria automotriz ya que presentan una alta resistencia mecánica de 600 a 1000 MPa, manteniendo buena conformabilidad. Existen diversos materiales base (aceros micro aleados, aceros de grano ultra fino, aceros al C-Mn, etc.) a partir de los cuales pueden obtenerse dichos aceros DP [14] en la figura. 7 podemos observar una la microestructura de un acero DP.

Por el contrario los aceros TRIP poseen tres fases, la matriz formada por ferrita y bainita y una fase de martensita. Las fases bainita y ferrita proporcionan la resistencia. Estos aceros contienen generalmente 5-7% de Mn por lo cual pueden llegar a tener desde 5-20% de austenita retenida; sin embargo, la concentración de austenita se puede aumentar con la adición de C y Ni después del tratamiento de recocido. Se

caracterizan además porque durante su deformación, aparece una fase dura en torno a la ferrita que genera un endurecimiento, donde la austenita retenida se transforma en martensita cuando aumenta la tensión, lo que aumenta por consiguiente su dureza en mayor grado que los aceros DP.

La transformación en martensita dependerá del contenido de carbono. Como inhibidores de la precipitación de carburos contienen Al y Si [10][11], en la figura. 8 observamos una microestructura de un acero TRIP.

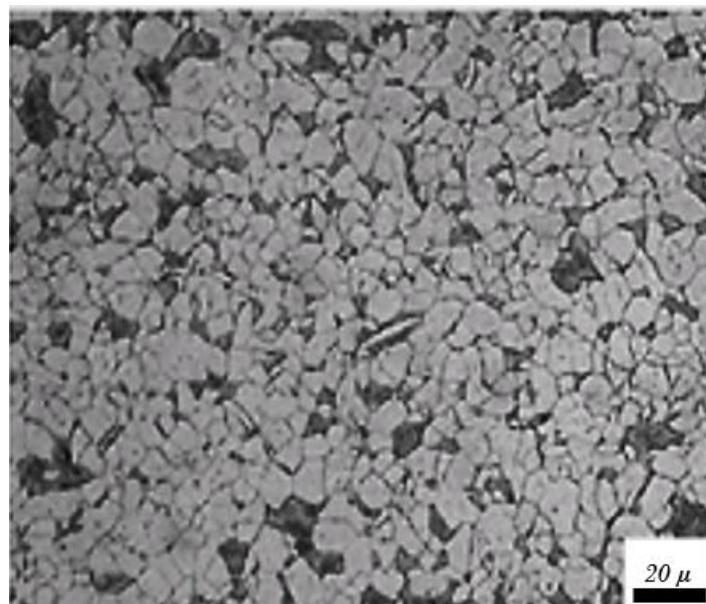


Figura 7 Micrografía de un acero de doble fase [3].

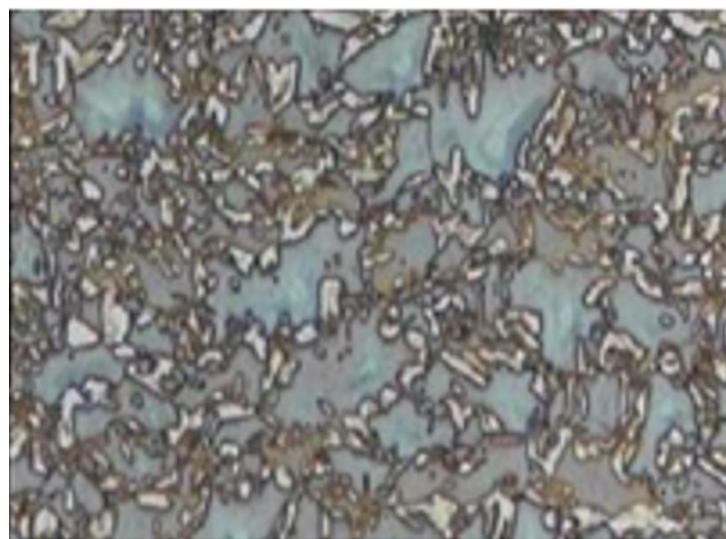


Figura 8 Micrografías de un acero TRIP [3]

Dependiendo de la velocidad de deformación y su contenido de austenita retenida serán las propiedades adquiridas para la resistencia al impacto y capacidad para absorción del impacto. A bajos niveles de carbono, la austenita retenida empezará a transformarse inmediatamente bajo deformaciones. A altos niveles de carbono la austenita retenida será más estable y se transformará con niveles de esfuerzos mayores [10][11].

En comparación con los aceros de fase dual y fase compleja, los TRIP, presentan mejor resistencia a la deformación y por lo tanto mayor capacidad de absorción de energía, de acuerdo a sus propiedades estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas de estructura y seguridad.

Recientemente se ha reportado el desarrollo de aceros TRIP -asistido (TBF) los cuales se producen por un proceso de transformación isotérmica (IT) con una temperatura mayor a la formacion de martencita, se pretenden emplear para el tren motriz, pero aún están en investigación.

Los aceros con plasticidad inducida por maclado (por sus siglas en inglés: TWIP) se caracterizan por su alto contenido de manganeso (20-35%), determinando que el acero sea completamente austenítico a temperatura ambiente. El contenido de austenita permite que estos aceros sean blandos y dúctiles y puedan emplearse en procesos de forja y laminación. El único modo de deformarlos es a través del maclado de los granos. El maclado causa un alto valor de velocidad de endurecimiento instantáneo (valor n) con una microestructura muy fina. Los límites de las maclas resultantes actúan como límites de grano y refuerzan el acero, generando un efecto llamado *twinning*, donde se presenta un emparejamiento entre los granos que actúan como multitud de bordes de grano, produciendo una resistencia extremadamente alta con una conformabilidad muy elevada. Estos aceros son resistentes en condiciones criogénicas (a bajas temperaturas); tienen generalmente como elementos aleantes al Si (<3%), C (<1.5 C), Al (<3%), así como N, Cr, Ni, V, Sn, P. Cada uno de estos elementos aleantes cambia la *energía de falla de apilamiento* (SFE) que a su vez depende del contenido de la aleación (Mn, C, Al, Si) y la temperatura. A mayor contenido de Si este disminuye, así como el Cr también la disminuye. La adición de Al suprime la precipitación de cementita durante el enfriamiento después de la laminación en caliente. La adición de Al aumenta

el límite elástico, elongaciones uniforme (UE) y post-uniforme (EPU), mientras que disminuye la cantidad y velocidad de endurecimiento por deformación y el envejecimiento de presión dinámica (DSA). Lo anterior es debido a la reducción de la actividad y la permeabilidad del C en la austenita [11].

Aceros trip – twip Debido a las propiedades de los trip y twip, se han desarrollado los aceros con Plasticidad Inducida por maclado, los cuales se caracterizan por contener Fe-Mn-Si-Al, donde dependiendo del contenido de Mn se obtienen diferentes microestructuras y pueden obtenerse aceros trip – twip o Twip, estos pueden absorber altas energías y tienen una alta plasticidad. Se ha reportado que en condiciones normales de fatiga los TRIP/TWIP, alcanzan límites de fatiga de 400MPa.

La tabla 2 nos muestra los principales aceros y algunas de sus propiedades, (X-IPTM es una marca depositada para un acero TWIP, propiedad conjunta de Arcelor y TKS) [2] [3].

Tabla 2 Tipos de aceros y algunas de sus propiedades.

Generación	Tipo	Denominación	Y _s (cedencia) Mpa	UTS(tensión) Mpa	A%
Primera	Convencional	Acero Dulce	140-280	270-400	----
	Convencional	Acero IF	180-300	340-460	
	Alta Resistencia	Acero BH	180-360	160-300	-----
		Acero BH 210/340	210	340	34-39
		Acero BH 260/370	260	370	29-34
	Alta Resistencia	HSLA (350/450)	350	450	23-27
		Doble Fase(DP) 280/600	280	600	30-34
Avanzados de alta resistencia	AHSS	DP 300/500	300	500	30-34
		DP 350/600	350	600	24-30
		DP 400/700	400	700	19-25
		DP 500/800	500	800	14-20
		DP 700/1000	700	1000	12-17

Segunda	Fase Compleja (CP) 700/1000	700	800	10-15
	Aceros TRIP 450/800	450	800	26-32
	AHSS Ultra alta resistencia	Martensíticos (Ms) 1250/1520	1250	1520
		Ms 950/1200	950	1200
		TWIP Aceros con plasticidad inducida por maclado	1100	1400
		X-IPTM	599	1162
		Acero al Boro	350-1100	500-1500

Este tipo de materiales nos ayudan a la fabricación de la transmisión de un automóvil la cual es el conjunto de mecanismos o componentes que hacen que el vehículo entre en movimiento para los cuales se toman los siguientes criterios de diseño; la potencia del motor, el peso del auto, las revoluciones de alimentación, el par de salida y las revoluciones de entrada a la caja de velocidades y el número de velocidades. En la figura 9 podemos observar los ejes de transmisión.



Figura 9 Ejes de una transmisión [6]

1.3 Cigüeñales

En la figura 10 podemos observar un cigüeñal también conocido como eje motor o árbol de manivelas es una de las piezas más importantes del motor de combustión interna, este es un eje acodado, con codos y contrapesos presentes en los automóviles. Su principal característica es su equilibrio estático y dinámico; el estático nos ayuda a la distribución de todo su peso de manera uniforme alrededor del eje y el dinámico a eliminar cualquier vibración generada durante su giro a causa de la fuerza producida por la bielas.



Figura 10 Cigüeñal de un automóvil

Su funcionamiento es transformar el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa, es decir convierte el movimiento lineal alternativo del pistón, producido por la presión de los gases de combustión y por intermedio de la biela en movimiento circular uniforme. Se construyen masas metálicas a los contrapesos que se presentan en posiciones opuestas a la de los codos de las bielas, así al girar cuando el motor está en funcionamiento la fuerza centrífuga generada es totalmente uniforme, ver figura 11-12.

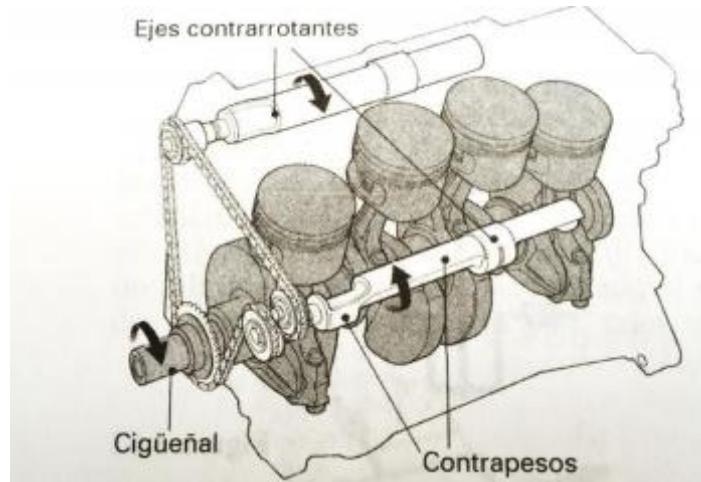


Figura 11 Funcionamiento de un cigüeñal

El cigüeñal está compuesto por:

- Muñones, Puños o Alfileres de Bancada.
- Muñones, Puños o Alfileres de Biela.
- Manivela, Codo o Brazo de Cigüeñal.
- Contrapesos.
- Extremos de Caja del Distribución y del Amortiguador de Vibraciones.
- Extremo del Volante de Inercia y Conductos de Lubricación.

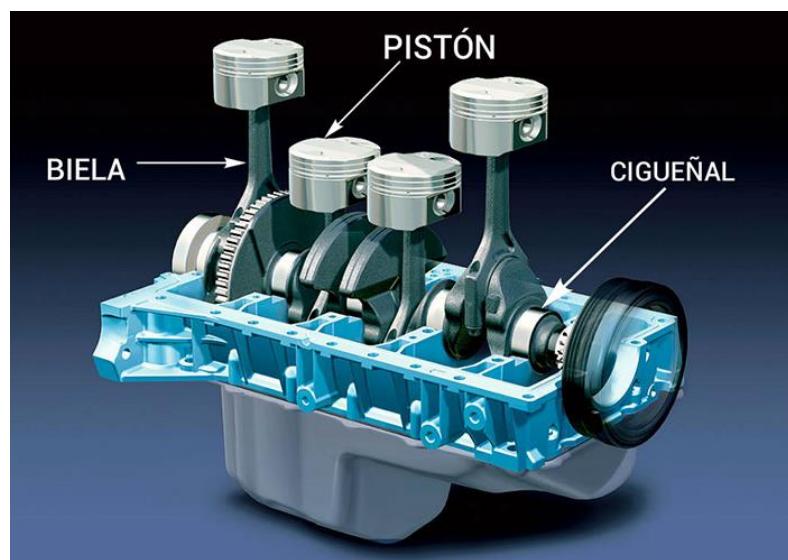


Figura 12 Partes de un motor.

Por su complejidad el cigüeñal posee ciertas propiedades mecánicas a temperatura de funcionamiento ideal (aproximadamente 110°C) del cigüeñal se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3 Propiedades mecánicas de un cigüeñal.

Propiedad	Magnitud
Límite elástico (N/mm²)	600
Módulo de Young (GPa)	203
Coeficiente de Poisson	0.29
Densidad (kg/m³)	7850
Conductividad térmica (K·m/W)	47
Módulo cortante (MPa)	136500

Nota estas propiedades son tomadas en base a un acero forjado al carbono y carbono – manganeso normalizado y templado. (Gomez L. Sergio Septiembre 2018 **Ánalysis tensional de un cigüeñal de un MCIA mediante elementos finitos**).

El material empleado generalmente para la construcción de los cigüeñales es de acero al carbono (con un rango del .025 al .045 % de carbono); también se emplean aceros especiales al cromo (Cr) - níquel (Ni) o al cromo (Cr)-molibdeno (Mb) – vanadio (V), cromo (Cr), níquel (Ni), vanadio (V), niobio (Nb), titanio (Ti) tratados térmicamente, se fabrican cigüeñales en fundición nodular que posee características de resistencia semejantes a las del acero al carbono. Los aceros que se utilizan para la fabricación de cigüeñales son los siguientes:

Tabla 4 Aceros aleados utilizados en la manufactura de cigüeñales.

Material	AMS	Porcentajes nominales de aleación de elementos						
		C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	V
4340	6414	0.40	0.75	0.82	1.85	0.25		
EN-30B	-	0.30	0.55	1.20	4.15	0.30	0.22	
4330-M	6427	0.30	0.85	0.90	1.80	0.45	0.30	0.70
32-CrMoV-13	6481	0.34	0.55	3.00	<0.30	0.90	0.25	0.28
300-M	6419	0.43	0.75	0.82	1.85	0.40	1.70	0.07

Para realizar el diseño de las transmisiones existen normas que nos facilitan el mismo, (ver tabla 5).

Tabla 5 Normas para la fabricación de transmisiones.

ISO (International Organization for Standardization)	DIN 2391	Propiedades de los Materiales	
	UNE 18016	Dientes normalizados de los engranajes	
	Une 36010	Normalización del acero	
	UNE 18113-1983	Cálculo de los rodamientos	
UNE (Una Norma Española)	DIN 625	Rodamientos de Bola	
	DIN 471	Anillos de retención	
DIN (Deutsches Institut Fur Normung)	DIN 6885	Chavetas	
	DIN 5412	Rodamientos de rodillos cilíndricos	
	DIN 5405	Rodamientos de Agujas	
	DIN 439	Tuercas	
ASME (American Society of Mechanical Engineers)	ASME	Calculo de ejes	

Uno de los aceros utilizados para la fabricación de partes automotrices **como el cigüeñal** es el ASI 4140 principalmente usado en el eje motor, de ahí se encuentran los aceros con aleación de Cr, Mo, V, Ti. Dentro de las transmisiones se diferencian

dos tipos de componentes: piezas propias y piezas comerciales, estas últimas las hacen fabricantes especializados para el uso que se les quiera dar [13].

Para la fabricación de cigüeñales se debe tener un alto estándar de calidad tanto en las piezas fabricadas a base de fundición como en las comerciales, por tanto se realizan pruebas para cada material [13].

El titanio tiene un mayor nivel de resistencia sin deformación que el aluminio y el magnesio. La industria automovilística como la aeroespacial están interesadas en usar más titanio por su combinación de resistencia y ligereza ya que es más ligero que el acero lo que afecta a la cantidad de combustible necesario, así como un mayor nivel de resistencia sin deformación que el Al y Mg. Sin embargo, su alto costo impide la fabricación de piezas de mayor tamaño y mayor complejidad, por tanto las investigaciones con esta aleación está dirigida a crear piezas con partes curvas y de tamaño pequeño como engranajes o ruedas. La mayoría de las aleaciones de titanio están formadas por aluminio en un 6% y vanadio en un 4%. Todo se basa en el precio. A medida que éste se reduzca se extenderán muchísimo las aplicaciones. El mayor avance de esta aleación se ve reflejado en la industria automotriz y si se usara un kg por automóvil fabricado por año se doblaría la cantidad total de titanio utilizado actualmente y reduciría su costo [9].

Y algunos de los materiales empleados para la fabricación de piezas de transmisiones contienen concentraciones bajas de titanio y vanadio las cuales favorecen sus propiedades mecánicas, así como la presencia de otros elementos aleantes que favorecen sus tratamientos térmicos. Las propiedades más importantes de estos materiales son la resistencia a la tensión y su límite elástico como se ha mencionado anteriormente. La tabla 4 muestra algunas de las propiedades de los materiales utilizados para transmisiones.

Y generalmente los aceros más utilizados para esta fabricación son de medio y bajo carbono (SAE 1020, 1025, 1030, 1035, 1040, 1045, 1050, etc.). Y para obtener ciertas propiedades mecánicas, ver Tabla 6 se añaden pequeños porcentajes de otros elementos como manganeso, cromo, silicio, vanadio, titanio, fosforo, azufre, molibdeno, níquel y aluminio.

Tabla 6 Propiedades mecánicas de los principales aceros para la fabricación de transmisiones.

Acero	Unidad	σ	IMPACTO IZOD						-A	Punto de fluencia	Fatiga σ
			ϵ	γ	A	HB	J	J			
			Mpa	Mpa	Gpa	%					
1020	441	294		35%	150-190				60%	331.5	
	-										
	539										
1025	250		103-	.8-			480	KI		338.3	
	-		118	0.3				C			
	350			%							
1030	LA	LAM(3		LAM	LAM(163-					345.2	
	M(5	40-		(20-	195), NOR						
	50-	400),		32)	(163-195),						
	650	NOR		%	RE(149-						
	)	(340-		NO	180),						
	NO	400),		R	EF(179-						
	R	RE(32		(22-	212)						
	(55	0-		34)							
	0-	390),		%							
	650	EF(54		RE(
	)	0-630)		25-							
	RE(			35)							
	500			%							
	-			EF(1							
	600			2-							
	)			20)							
	EF(%							
	600			E.N							
	-			AT							
	700			(32							
)			%)							
1035	LA	LAM(3		LAM	LAM(174-					377.5	
	M(5	60-		(18-	201), NOR						
	90-	420),		30)	(170-207),						
	690	NOR		%	RE(158,19						
	)	(360-		NO	2),						
	NO	420),		R	EF(195-						
	R	RE(34		(20-	221)						
	(59	0-		30)							

0-	410),	%	E.NAT(17						
690	EF(58	RE(	9)						
) ,	0-670)	22-							
RE(		32)							
530		%							
-		EF(1							
630		0-							
) ,		20)							
EF(%							
650		E.N							
-		AT(2							
750		9%)							
)									
1040	620	415	25	201	45	6	4	50	413.8
					5	9			
1045	RE	2000	REC	REC(160-	38		REC	REC(379)	
C	00	(26)	200)				(53)	REV(558)R	
(62		%	REV540(2				%	EV(621)	
0)		REV	28)				REV	BC(413.8)	
RE		540(	REV540(2				(45)		
V54		18)	42)				%		
0(7		%					REV		
93)		REV					(52)		
RE		(19)					%		
C54		%							
0(8		REV							
27)		EN							
		50m							
		m							
1050	LA	LAM(4	LAM	LAM(212-			413		
M(7	20-		(15-	248), NOR			.8		
00-	490),		22)	(212-248),					
820	NOR		%,	RE(187-					
) ,	(420-		NO	217),					
NO	490),		R	EF(229-					
R	RE(37		(18-	269)					
(70	0-		22)	REEF(226					
0-	420),		%,	-264)					
820	EF(69		RE(
) ,	0-810)		22-						
RE(	REEF(		32)						
620	670-		%,						
-	790)		EF(1						
720			0-						
) ,			18)						
EF(%,						
770			REE						
-			F(8-						
900			16)						
)			%						
RE									
EF(
750									
-									
880									
)									

SAE 4140	108 592 4.3 Pa	10255 95.15 Pa	18.1 0%	321	66	
G4140	900 - 105 0		12% 275-320		50%	690
16MnCr 5	650 - 880	2000 00	8- 25%			350-550
4340	122 7		10%	363	30%	689
4340(J1 397)	120 0		16%	352	48%	1124
DIN 15Cr3	690 - 880		10%	41 AKV/J		
DIN 15CrNi6	742		RE(152- 201) CEM(230)			
DIN 34CrMo 4	650 - 680	2000 00	8- 25%		350-550	275
DIN 37MnSi 5	650 - 680	2000 00	8- 25%		350-550	275
DIN 30CrMo V9 o	650 - 681	2000 00	8- 25%		350-551	275
DIN 36CrNi Mo4,						
SAE 6150	420 - 670	190- 210	23%	197	27	
SAE 440B	≥44 2	≥ 334	11%	241	14	41%
UNEF.3 405	≥ 318	≥ 862	11%	132	32	32%

En la tabla 7 podemos observar los aceros utilizados para la fabricación de transmisiones automovilísticas así como su composición química.

Tabla 7 Composición Química de aceros utilizados para transmisiones.

Acero	Composición Química (% peso)										
	C	Mn	Si	S	P	Mo	Ni	Cr	V	T	Cu
1020	0.18 - 0.23	0.3 - 0.06	.015 0.3%	0.05 %	0.04 %						
1025											
1030	0.28 0.34%	0.60 0.90%	0.15 0.30%	0.05 %	0.04 %	-	-	~	~	~	~
1035	0.32 0.38%	0.60 0.90%	0.10 0.30%	0.05 %	0.04 %						
1040	0.40%	0.11%	0.03%	0.03	0.01	~	~	~	~	~	0.0 3%
1045	0.43 0.50%	0.6 0.9%	0.2 0.4%	0.05	0.04						
1050	0.48 0.55%	0.60 0.90%	0.10 0.30%	0.05 %	0.04 %						
4140	0.40%	0.90%	0.30%			0.2 0%		1.00%			
4140	0.38 0.43%	0.75 1%	0.15 0.35%	0.05 %	0.04 %	0.1 5 0.2 5%		0.8 1.10%			
16MnCr 5	0.14 0.19%	1.00 1.30%	0.40% 5%	0.03 5%	0.03 5%			0.8 1.10%			
4340	0.38 0.43%	0.60 0.80%	0.15 0.35%	0.04 %	0.04 %	0.2 0 0.3 0%	1.65 2%	0.8 1.10%			
4340	0.38 0.43%	0.60 0.80%	0.15- 0.35%	0.04 %	0.04 %	0.2 0- 0.3 0%	1.65. 2%	0.8 1.10%			
15Cr3	0.12% 0.18%	0.40 0.60%	0.15- 0.40%	0.03 5%	0.03 5%			0.400. 70%			
15CrNi 6	0.14 0.17%	0.4 0.60%	0.40% 5%	0.03 5%	0.03 5%		1.40- 1.70 %	1.401. 70%			
34CrMo 4	0.30 0.37%	0.60 0.90%	0.40% 5%	0.03 5%	0.03 5%	0.1 5 0.2 0%		0.90- 1.20%			
37MnSi 5	0.33 0.41%	1.1 1.40%	1.1 1.40%	0.03 5%	0.03 5%						

30CrMo	0.32- 0.40%	0.50 0.80%	0.40% 5%	0.03 5%	0.03 5%	0.1 5	0.90- 1.20	0.901. 20%	
V9 o 36CrNi Mo4,							0.3 0%	%	
6150	0.480 0.530	0.70 0.90	0.15 0.30%	0.04 %	0.03 5%		0.8- 1.10%	\geq 0.1 50	
440B	0.85 0.95%	1% 5%	1% %	0.01 0	0.04 1.3 0%	0.9 1.3 0%	17- 19%	0.0 7- 0.1 2%	
F.3405	0.43 0.50%	1% 5%	1% %	0.01 0	0.04 1.3 0%	12. 5 14. 5%			

En la actualidad, la industria automotriz tiene entre otros objetivos los siguientes:

- la fabricación de autos más ligeros,
- Cumplir con las normas ambientales y
- Cumplir con las normas de seguridad.

Es de gran relevancia el diseño de las partes automovilísticas y el uso de materiales que ayuden a disminuir el peso de los vehículos, disminuir contaminación del medio ambiente y cumplir las normas de seguridad.

El material predominante en la fabricación de carrocerías de automóviles es el acero, debido a sus propiedades mecánicas. También se puede encontrar otros tipos de materiales en la fabricación de automóviles, por ejemplo el vidrio, aluminio, polímero y fibra de carbono, entre otros .La figura 13 muestra la carrocería de un modelo de automóvil destacando las partes que se pueden fabricar con estos materiales.



Figura 13 Carrocería de un automóvil [2].

De acuerdo con García Lázaro Diego [7], en los últimos años el aluminio y los polímeros han aumentado sus porcentajes en la composición de las carrocerías. Sin embargo, el acero en las carrocerías constituye entre el 70 y el 80 % del peso total de una carrocería, aproximadamente.

En la década de los años cincuenta se fabricaban piezas metálicas muy pesadas y de una sola clase de acero, lo cual iba en deterioro de la seguridad pasiva de los vehículos [8].

Sin olvidar que la seguridad pasiva son los elementos que reducen al mínimo los daños que se pueden producir cuando el accidente es inevitable,

- Cinturones de seguridad,
- Reposacabezas,
- Bolsas de aire (los airbags),
- Cristales,
- Chasis y carrocería) [21].

En la actualidad las empresas automotrices han ido innovando diseños y materiales; esto les ha permitido el desarrollo de chasis de menor peso.

Se crean líneas de investigación para encontrar materiales aptos que consigan aumentar los niveles de seguridad activa y pasiva del automóvil con la creación de

aleaciones de hierro mezclando otros elementos como manganeso, silicio, aluminio, entre otros, con unas cualidades de rigidez y flexibilidad, ideales para la fabricación de algunas de las partes de la carrocería u otros componentes para el vehículo.

Cabe mencionar que la seguridad activa es el conjunto de todos aquellos elementos que contribuyen a proporcionar una mayor eficacia y estabilidad al vehículo en marcha, y en la medida de lo posible, evitar un accidente cuyos elementos son:

- Sistema de frenado,
- Sistema de dirección,
- Sistema de suspensión y
- Los neumáticos y su adherencia al suelo [21].

Cada material tiene determinadas propiedades físicas, químicas y mecánicas que lo harán más o menos idóneo para una función concreta, dependiendo básicamente del tipo de necesidades al que sea sometido [5], podemos observar algunas de ellas en la figura 14 se observan partes y componentes de un vehículo con diferentes materiales en el sector automotriz y en la figura 15 su aplicación con respecto a su resistencia a la ruptura y su alargamiento.

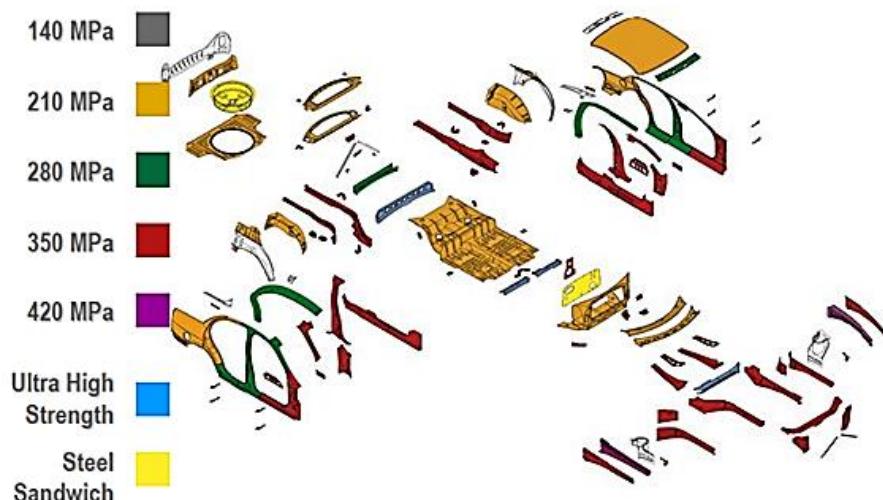


Figura 14 Materiales del sector automotriz [3].

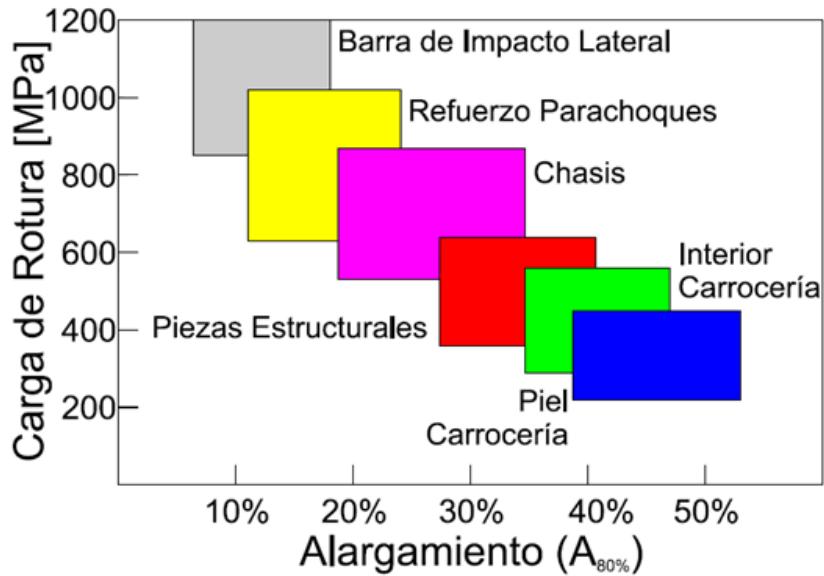
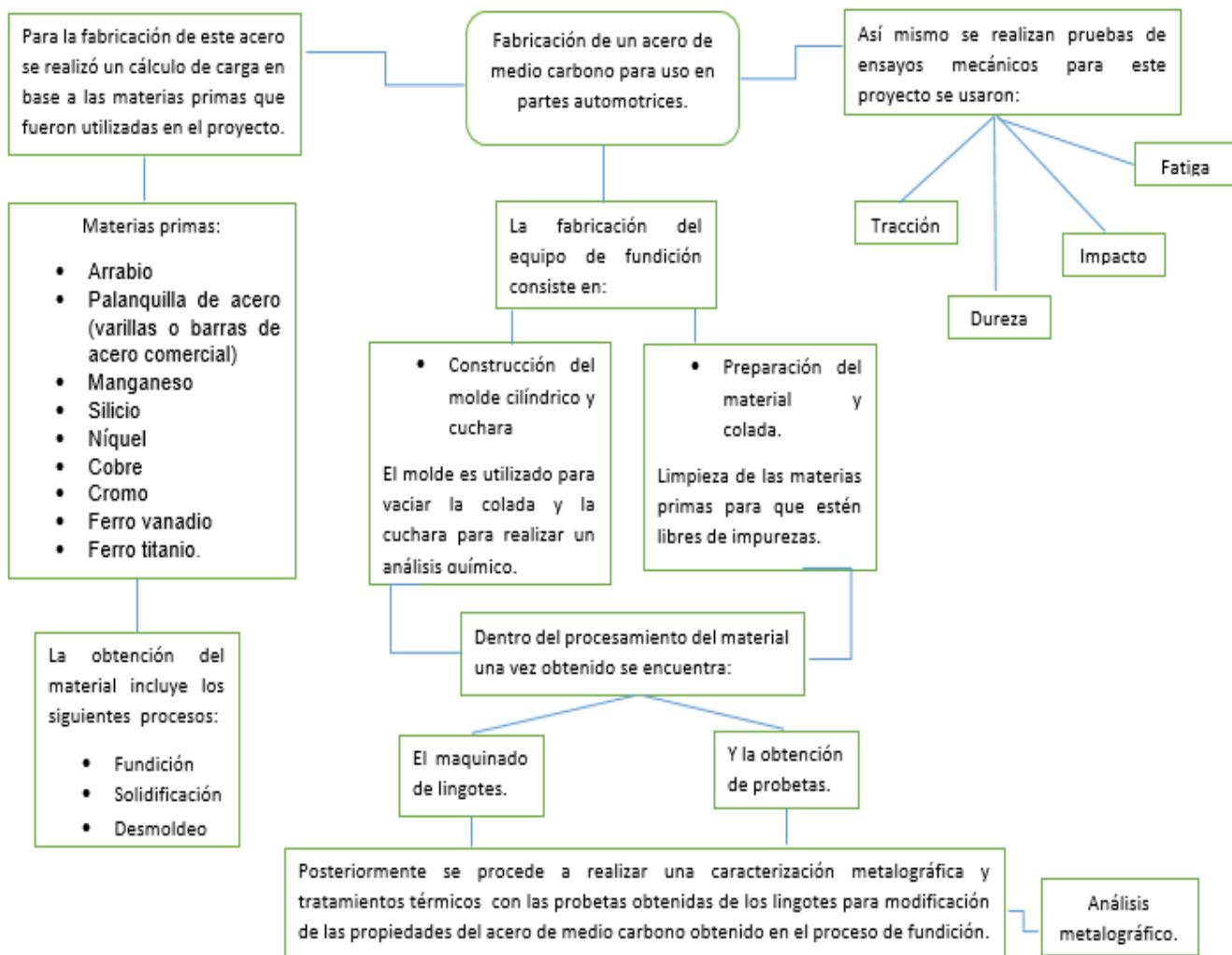


Figura 15 Aplicación en el sector automotriz [3].

Hasta nuestros días el uso del acero es necesario en la proceso de fabricación del vehículo, de este material existen diferentes tipos según sea su aplicación, por la cantidad empleada el peso de un auto recae en este material; las industrias automotrices invierten en investigaciones para aligerar su peso a partir de diferentes procesos y aplicarlos en diferentes áreas del automóvil y tengan las mismas o mejores propiedades.

CAPÍTULO II. EXPERIMENTACIÓN

2.1 Diagrama de flujo



2.2 Fabricación de aleaciones metálicas

En esta sección se describe el proceso experimental para la obtención de un acero de medio carbono a partir de las aleaciones con diferentes elementos, para poder ser usado en las transmisiones del sector automotriz.

2.2.1 Materias primas

Los materiales que se usaron para la elaboración de este proyecto se describen a continuación:

- Arrabio
- Palanquilla de acero (varillas o barras de acero comercial)
- Manganeso
- Silicio
- Níquel
- Cobre
- Cromo
- Calcio
- Ferro vanadio
- Ferro titanio.

Para la fabricación del material se realizó el cálculo de carga a partir de las composiciones de conocidas de arrabio y palanquilla de acero utilizado como materiales base, los elementos aleantes considerados para el cálculo de la carga de acuerdo a la composición química requerida fueron elementos puros que se adicionaron al material base los cuales se muestran en la figura 16t ya fundido.

Para la fabricación de las aleaciones se utilizó palanquilla de acero como materia prima con la composición química siguiente Tabla 8.

Tabla 8 Composición química de la materia prima

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.13	0.13	0.48	0.007	0.007	0.02
Al	Cu	Nb	V	B	Fe
0.005	0.02	0.05	0.03	0.0003	99.17



Figura 16 Elementos aleantes que se adicionaron al material base.

2.2.2 Cálculo de carga para la obtención de aleaciones

Para la forja de los cigüeñales a nivel industria se fundieron 15 lingotes con una composición química básica de vanadio (0.11 % wt) y 1.17% de manganeso + calcio para el balance de carga se tomó en cuenta la composición química diseñada que se muestra en la tabla 7.

Tabla 9 Composición química base.

Elemento	%peso (promedio)	%peso (Límite máximo y mínimo permitido)
Carbono	0.38	0.36-0.40
Manganeso	1.17	1.00-1.35
Silicio	0.57	0.50-0.65
Cobre	0.25	Máx.
Cromo	0.15	0.10-0.20
Níquel	0.15	Máx.
Azufre	0.57	0.050-0.065 (nivel industrial) ≤0.065 (nivel laboratorio)
Aluminio	0.03	Máx.
Nitrógeno	0.015	0.013-0.017
Fosforo	0.02	Máx.
Molibdeno	0.05	Máx.
Vanadio	0.11	0.08-0.12
Titanio	0.08%	0.04-0.08
Calcio	0.04	0.04 -0.06

Para este lote, se realizaron 15 coladas de 37 kg cada una. Para ajustar el contenido de carbono (0.38%wt) se utilizó material Sorel y grafito el cual observamos en la figura 17, el cual tiene un contenido de carbono de 3,9% en peso. Por lo tanto, se utilizaron 2113.51 gramos de sorel y 34,890 gramos de acero.



Figura 17 Material para el ajuste del contenido de carbono.

Para adecuar los contenidos de elementos aleantes, se realizaron las siguientes adiciones:

Tabla 10 Ajuste de contenidos de elementos aleantes.

Elemento	Cantidad (gramos)
Manganeseo puro	216.68
Silicio puro.	49
Cromo puro.	51
Cobre puro.	51
Níquel puro.	22
Vanadio	35.233.

Es importante señalar, que en las cantidades que se reportan ya está considerado la eficiencia, pérdidas y porcentajes de las ferroaleaciones.

2.3 Preparación de equipo de fundición

2.3.1 Construcción del molde cilíndrico y cuchara

Se utilizaron dos moldes metálicos conocidos como lingoteras, para la fabricación del acero de medio carbono microaleado con vanadio (V) más titanio (Ti), del cual se diseñaron y fabricaron lingoteras cilíndricas metálicas, figura18.



Figura 18 Preparación del equipo para la fundición.

Con dimensiones de 600 mm de largo X 100 mm de diámetro y con un espesor de 5mm, de igual forma se diseñó otro tubo con la finalidad de ayudar al desmoldé del material, con solera de 150 mm X 150 mm y espesor de 19.05 mm (3/4"). El objetivo de utilizar un molde metálico es el de lograr la solidificación rápida del material líquido y evitar la segregación de elementos aleantes que pueden reducir las propiedades mecánicas de tenacidad y fatiga al no tener una estructura homogénea, figura 19.

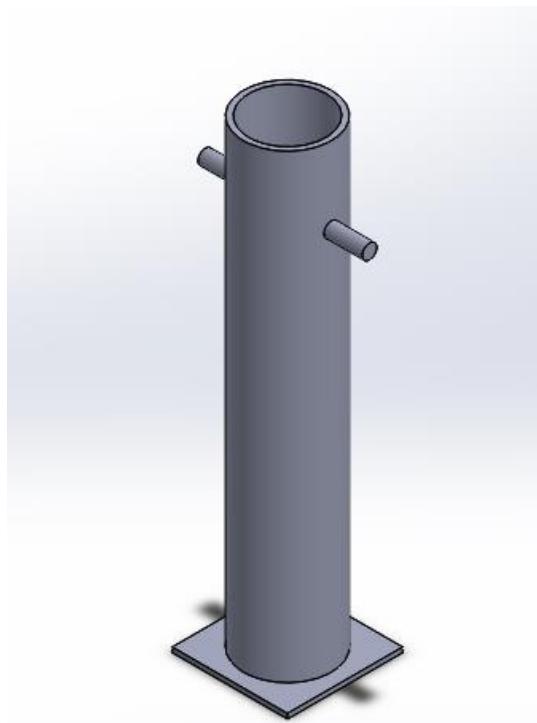


Figura 19 Diseño estructural del molde para el material fundido.

Se fabricó una cucharilla metálica figura 20, para obtener un muestra del material para realizar un análisis de la composición química del mismo. En la fabricación de las cucharillas metálicas se utilizó tubo de 3.7 cm de diámetro (1.5 in) X 40 mm de largo al cual se le soldó un tubo redondo sólido de 6.25 mm ($\frac{1}{4}$ in) X 450 mm de largo para utilizarlo como mango de la cucharilla metálica. A esta misma se le colocó una tapa en la parte inferior de solera de 6.25mm ($\frac{1}{4}$ in) de espesor X 40 mm X 40 mm.

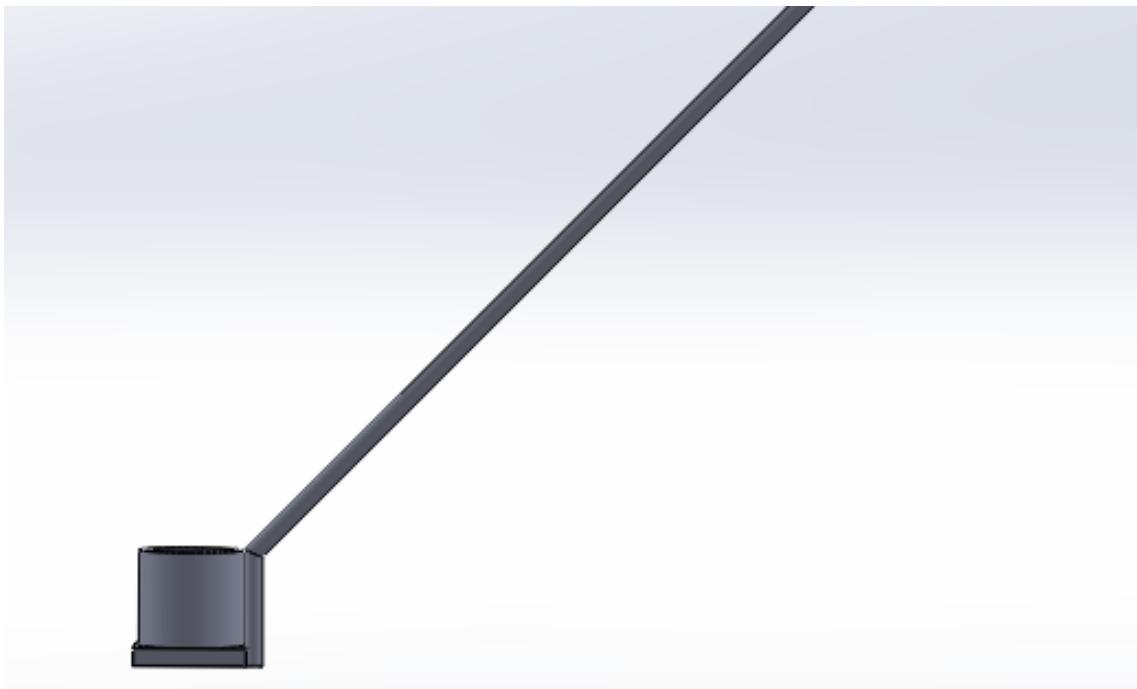


Figura 20 Diseño de la cucharilla para análisis químico.

Los moldes metálicos o lingoteras fueron unidos con soldadura eléctrica de arco manual utilizando electrodo revestido (7018) por sus características mecánicas. Para el armado de las lingoteras se colocó una placa de 25 mm de espesor para direccionar la solidificación esta fue unida con puntos de unión para su fácil remoción una vez colocado el acero ver figura 21.



Figura 21 Soldadura de placa de acero de 25 mm para direccionar la solidificación.

El molde cilíndrico se fabricó partir de un tubo que fue longitudinalmente cortado para una capacidad de 35 a 40 kg de acero y les fueron soldados trozos de varillas aproximadamente de 50 mm cada una para que pudieran ser sostenidos por el maneral.

Fabricadas las lingoteras se introdujo el otro tubo de 100 mm X 600 mm con espesor de 2mm, se le realizo otro corte al borde de la costura para evitar que el metal fundido se pegara al molde ayudando a la aceleración del efecto chill, después fue lijado, posteriormente se le colocó pintura térmica a lo largo de la parte superior e interior para poder introducirlo con mayor facilidad y así facilitar la remoción del acero, figura 22 y figura 23.



Figura 22 Introducción del tubo de menor espesor en la lingotera.



Figura 23 Encamisado de la lingotera de acero para obtener un diámetro de 9.6 cm y acelerar el efecto chill.

Previo a la fundición se cortó la palanquilla de acero en una cierra cinta para que pudiera ser más fácil su manipulación y su limpieza, figura24, se seleccionó y se separó para las diferentes fundiciones a realizar, figura 25.

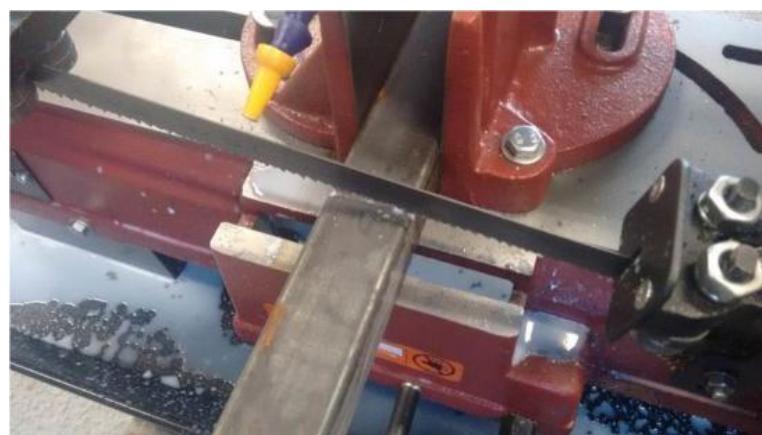


Figura 24 Corte en sierra cinta de las palanquillas de acero.



Figura 25 Materia prima de palanquilla de acero seleccionada para la fundición del acero 38MnVS.

De igual manera se cubrieron las lingoteras en su sección superior con una colcha cerámica refractaria figura 26, para reducir la velocidad de enfriamiento y evitar el rechuve que ocurre en el material colado durante la solidificación direccional.



Figura 26 Lingotera con lana térmica para reducir el rechuve.

2.3.2 Preparación del material y colada

En la figura 27 podemos observar el material que se cortó para ser pesado en una balanza y obtener la cantidad estimada de acuerdo a nuestro balance de carga para cada una de las fundiciones a realizar. Antes de realizar la fundición la palanquilla de acero y los elementos aleantes se limpiaron con carda de cerdas de acero, cepillo metálico y lijas para eliminar el óxido, grasas, polvo, etc. tal como se muestra en la figura 28, que contaminen el material a fabricar y tengan un efecto negativo sobre la composición química final, en la figura 29 podemos observar el material ya limpio y listo para ser usado en la fundición.



Figura 27 Material Sorel para el ajuste del contenido de carbono.



Figura 28 Limpieza de la palanquilla de acero



Figura 29 Sorel (arrabio) y palanquilla de acero limpios.

La colada o vaciado es uno de los procesos más antiguos que se conocen para trabajar los metales, es el proceso que da forma a un objeto al entrar material líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada u otro material que se llama molde y dejar que se solidifique el líquido (ver figura 30).

Para este proyecto el vaciado se realizó alrededor de 1700°C, durante este se tomaron muestras chill o de solidificación rápida en cucharillas de acero para el análisis químico ver figura 31.



Figura 30 Proceso de vaciado del acero.



Figura 31 Técnica de vaciado de metal alrededor de 1700°C.

2.4 Fabricación del material

Para hacer la fusión y obtención del acero de medio carbono microaleado con vanadio y titanio de este proyecto, se utilizó un horno de inducción el cual se muestra en la figura 32, con una capacidad de 50 kilogramos. Este fue operado a 34.8 Kilowatts, el tiempo de fusión por colada es de 60 minutos

En dicho horno se fundió una mezcla de elementos de alta pureza, así como arrabio y chatarra de acero de composición conocida, para obtener coladas de 35 kilogramos. Como aleación base se utilizó un acero microaleado de composición comercial, con 38 % C, 0.050 % Si, 1.30 % Mn, al cual se le realizaron adiciones de V y Ti de 3 % y 5 %, en peso respectivamente.



Figura 32 Horno de inducción de 50 kg de capacidad, utilizado para la fusión de aleaciones de hierro.

La fusión del acero comienza con la colocación de la mayor cantidad de palanquilla de acero en el crisol del horno Figura 33.



Figura 33 Colocación de palanquilla dentro del crisol.

Se eleva la potencia del horno hasta 35 kilowatts (ver figura 34) hasta alcanzar la temperatura de fusión de 1700°C



Figura 34 Control de potencia del horno.

En las siguientes imágenes podemos observar el inicio de la fundición (ver figura 35), desde el inicio de la fundición hasta el 80%, figura 36; se agregó sarel por el ajuste del contenido de carbono, figura 37, cuando el material está en estado líquido, posteriormente se agrega escoreador para eliminar el exceso de óxido (ver figura 38) en forma de escoria e introducir oxígeno debido a que se pueden formar compuestos que fragilizan el acero.



Figura 35 Inicio de la fusión de la palanquilla de acero.



Figura 36 Metal fundido en un 80%.



Figura 37 Material para el ajuste del contenido de carbono



Figura 38 Metal fundido con presencia de oxidación.

En la figura 39 podemos observar la fundición desoxidadada y una vez que esta de esta manera y casi completa se procede a la adición de los elementos aleantes.



Figura 39 Metal fundido desoxidado con aluminio.

Los elementos aleantes se añadieron en el siguiente orden:

1. Silicio (Si)
2. Níquel (Ni)
3. Manganeso (Mn)
4. Cobre (Cu)
5. Cromo (Cr)
6. Vanadio (V)
7. Titanio (Ti)
8. Calcio (Ca).

En la siguiente figura podemos observar cómo se añadió cada elemento.



Figura 40 Adición de elementos aleantes.

Los elementos microaleantes se adicionaron poco antes de realizar el vaciado del metal, esto con la finalidad de evitar pérdidas de oxidación (ver figura 41).



Figura 41 Adición de elementos micro-aleantes.

El material líquido debe ser constantemente agitado y así evitar que se solidifique en su parte superior y retrase su fusión. La medición de la temperatura se realizó mediante un termopar tipo K y pirómetros de contacto tipo lanza además de un pirómetro óptico como referencia el monitoreo fue mediante un termopar de inmersión, figura 42.



Figura 42 Monitoreo de la temperatura con un termopar.

Al término de la adición de todos los elementos y que estos se han disuelto en el metal líquido hasta lograr una mezcla homogénea (no se debe observar trozos de los elementos aleantes flotando), se procede al vaciado del metal en el molde, esto se realiza de forma manual con un maneral de acero, figura 43. Llena la lingotera con el metal líquido se debe colocar arena sílica en la parte superior para reducir la velocidad de enfriamiento y solidificación para reducir el rechuve y obtener un lingote sano, figura 44.

Ya solidificado y enfriado, se remueven los puntos de soldadura del molde para extraer el lingote y proceder a cortar probetas de ensayos mecánicos y de metalografía. De forma similar se extraen las muestras obtenidas para realizar análisis químico, figura 45.

La mazarota de arena sílice colocada en la parte superior cumplió con la función de dirigir el chorro de metal y ayudar a aminorar el rechuve, así mismo, la parte superior de la mazarota fue cubierta con arena para disminuir las pérdidas de calor y tratar de direccionar la solidificación.



Figura 43 Vaciado del material en las lingoteras.



Figura 44 Reducción del rechupe a través de arena sílica.



Figura 45 Muestra para análisis químico.

2.4.1 Solidificación

El proceso de solidificación se llevó a cabo en las lingoteras metálicas con un enfriamiento al aire, en la parte superior de algunas lingoteras se colocó una mazarota de arena sílice endurecida con silicato de sodio. Para el enfriamiento de las lingoteras se colocó la base en arena Figura 46.

Se realizaron diferentes pruebas con la finalidad de reducir el rechuve que se forma en la última parte en solidificar (Figura 47), por lo que además de la mazarota de arena sílice endurecida también se utilizó la colcha refractaria, en las otras lingoteras solo se usó colcha refractaria



Figura 46 Solidificación del metal en lingotera metálica.



Figura 47 Lingotera con mazarota y colcha refractaria al término del proceso de solidificación.

La colcha cerámica se removió ligeramente al ver parte de la solidificación terminada observando en la parte superior una mayor temperatura, al ser esta la última en solidificar se tiene una reducción en el rechuve lo que permite un mayor aprovechamiento del material.

2.4.2 Desmoldeo

Este proceso se llevó a cabo después de que el material se enfriara por completo hasta temperatura ambiente, algunos lingotes fueron reutilizados por su sencilla extracción, en otros casos se tuvo que destruir la lingotera y ya no pudo ser reutilizable.

2.5 Procesamiento del material

2.5.1 Maquinado de lingotes

Extraído el lingote se llevó a cabo el proceso de maquinado. La primera parte consistió en realizar el corte de la mazarota o rechupe, la segunda parte consistió en ajustar el lingote a las dimensiones finales de 9.8 cm de diámetro y 40 cm de longitud. Este proceso se muestra en las siguientes figuras.



Figura 48 Lingote fundido y listo para ser maquinado a las dimensiones de forja.



Figura 49 Proceso de maquinado de los lingotes.



Figura 50 Lingote maquinado y preparado para ser forjado.

2.5.2 Obtención de probetas

Las probetas para los ensayos mecánicos y caracterización metalográficas se obtuvieron realizando cortes de 12mm y 15mm a los lingotes, de estas mismas se secciono en cuatro partes para obtener dos probetas de 10mm de cada sección, la figura 51 muestra la forma en la que se realizó el seccionamiento. Se obtuvieron 10 probetas de cada composición química para evaluar la reproductibilidad de los resultados.

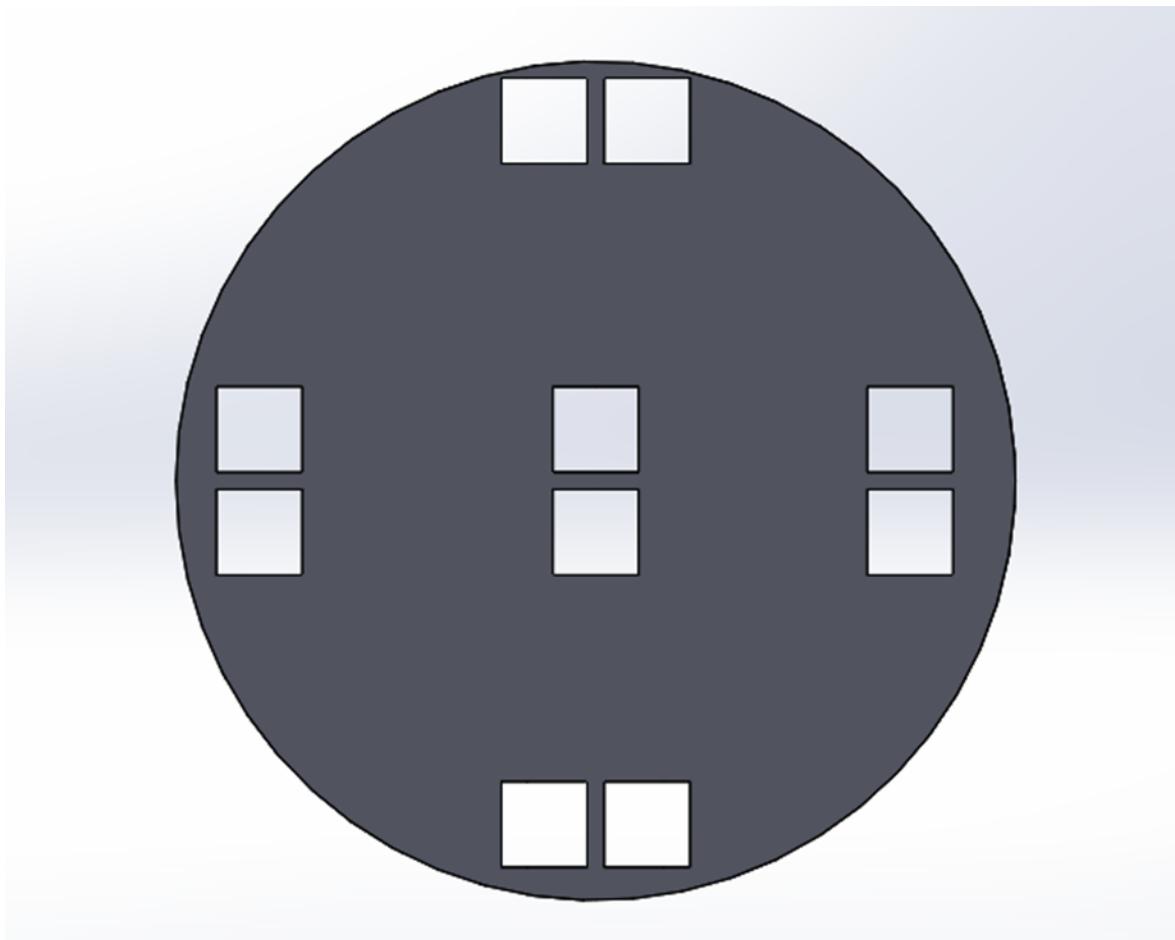


Figura 51 Imagen esquemática del seccionamiento para obtención de probetas.

2.6 Caracterización metalográfica y tratamientos térmicos

El objetivo de la caracterización es conocer el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades, que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas. Y el uso de los tratamientos térmicos nos permite manipular la microestructura del metal para así modificar su tamaño de grano y algunas de sus propiedades mecánicas.

En la figura 52 se muestra una probeta a la cual se le tomaron 10 micrografías (fotografías) en 5 secciones como podemos observar en la imagen a las cuales se les denominó zonas por cada composición química y sobre ellas se realizó el conteo del

porcentaje de ferrita y perlita, una vez obtenidas estas micrografías se determinó el tamaño de grano promedio por muestra en las diferentes coladas.



Figura 52 Zonas para toma de micrografías de todas las muestras.

El tratamiento térmico realizado en las probetas de diferente composición química fue el de normalizado en el cual se colocaron dentro de una mufla Furnace 1400 la cual se muestra en la figura 53 a una temperatura de 900°C por un periodo de tiempo el cual fue calculado a partir de las dimensiones de las probetas tomando en consideración que este tratamiento nos marca 1hr 25 min por pulgada [17].



Figura 53 Mufla Furnace 1400 para tratamientos térmicos.

2.7 Preparación para el análisis metalográfico

La preparación metalográfica se hizo en base a la norma ASTM E3-11. La técnica utilizada se describe a continuación:

El primer paso consistió en un desbaste manual con papel abrasivo de carburo de silicio de grados 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 y 2400.

Posteriormente las muestras se sometieron a un pulido utilizando un paño de fibra de rayón sintética alúmina de 5 μm , 1.2 μm y pasta diamante de 3 μm , 1 μm como abrasivos y lubricantes en una pulidora metalográfica Minitech 233 marca PRESI, la cual se muestra en la figura 54.



Figura 54 Pulidora metalográfica para la preparación de probetas.

Después del pulido las muestras fueron atacadas con una solución reactiva conocida como nital al 3% por 8 segundos para revelar su microestructura.

La cuantificación del contenido de fases en condiciones de colada se realizó mediante análisis de imágenes utilizando fotografías digitales obtenidas del microscopio óptico marca Nikon modelo Eclipse MA 100 el cual se muestra en la figura 55 las fotografías fueron tomadas a 100 magnificaciones.



Figura 55 Microscopio óptico y equipo para análisis metalográfico.

Se analizaron 50 fotografías por muestra en 5 secciones diferentes del material. Las micrografías se analizaron mediante el software Sigma Scan para determinar el porcentaje de ferrita y perlita. La medición del tamaño de grano se realizó por el método comparativo de acuerdo a la norma ASTM E 112.

2.8 Ensayos mecánicos

2.8.1 Ensayos de tracción

Para poder realizar este ensayo se suele utilizar una máquina universal la cual aplica un esfuerzo sobre la probeta para alargarla y mide el alargamiento producido y el esfuerzo aplicado. En este ensayo se somete a tracción a una probeta normalizada de un material hasta que se alcanza la rotura. La probeta suele ser cilíndrica con ensanchamientos en sus extremos para su fijación a las mordazas de la máquina. Con dichas medidas de fuerza y alargamiento y de las dimensiones de la probeta (sección y longitud inicial) se obtiene una gráfica que representa la tensión σ (Fuerza aplicada / sección de la probeta) frente a la deformación longitudinal unitaria de la probeta ϵ (alargamiento / longitud inicial).

En la figura 56 se muestran ejemplos de dos curvas correspondientes al ensayo de tracción de un material frágil y uno dúctil.

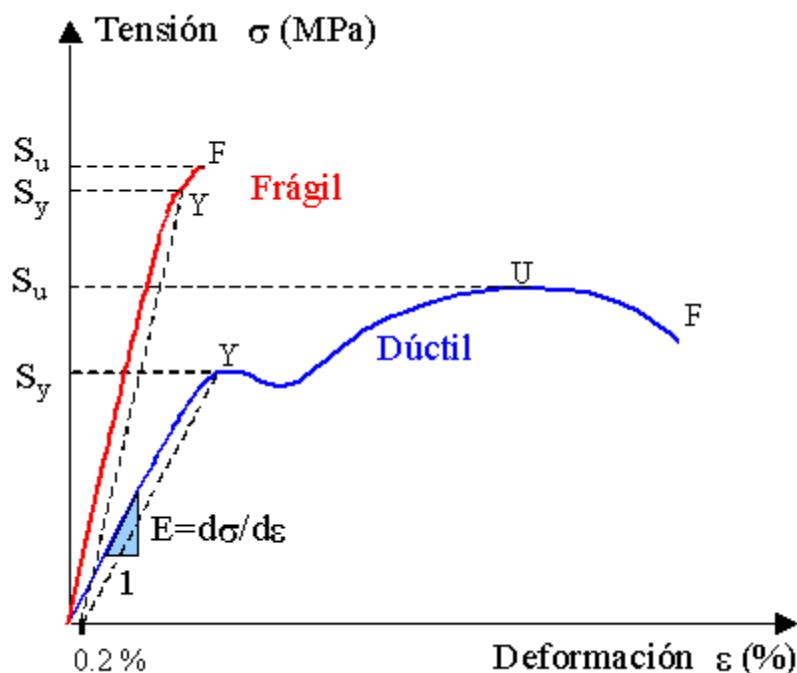


Figura 56 Grafica obtenida del ensayo de tracción (tensión- deformación).

La curva obtenida tiene los siguientes puntos característicos:

- Y: Límite de fluencia (punto que marca el fin de la zona de comportamiento elástico, en el que la deformación permanente alcanza el 0.2 %)
- U: Límite de resistencia última (máxima tensión que resiste el material antes de romper)
- F: Límite de rotura (punto en el que rompe el material) [22].

En este proyecto los ensayos de tensión se realizaron conforme a la norma ASTM E8 [15], se llevaron a cabo en una maquina servo hidráulica INSTRON 8802 con capacidad de 250 KN la cual se muestra en la figura 57, en probetas de tamaño estándar ver figura 58.



Figura 57 Maquina servo hidráulica para ensayos mecánicos.

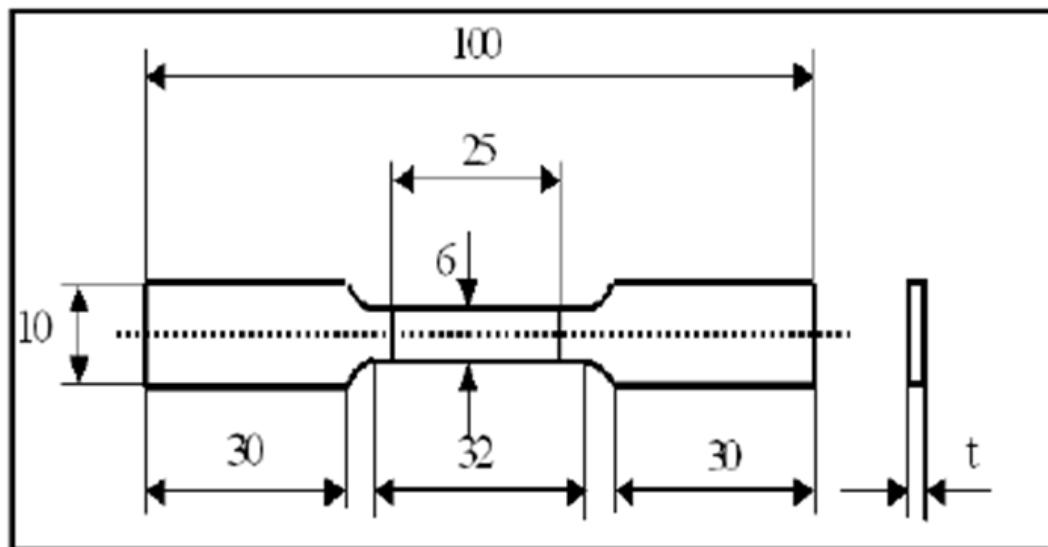


Figura 58 Probetas normalizadas para ensayos de tensión.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y se midió el límite de cendencia resistencia máxima y porcentaje de deformación.

2.8.2 Dureza

La dureza es una propiedad que tienen los materiales en general la cual puede resistir toda deformación plástica o destrucción permanente por rayado o penetración dejando una huella en la superficie del material debido a la acción de esfuerzos originada por un identador o penetradora más duro y que no sufre deformaciones residuales durante el contacto [23].

Existen tres tipos de ensayos que se emplean para obtener la dureza de un material, los cuales son:

- Dureza Brinell (HB),
- Dureza Vickers (HV),
- Dureza Rockwell (HR).

Cada ensayo es utilizado según sea la necesidad, el ensayo más extendido es el ensayo Rockwell, puesto que este realiza una medición directa sobre el material de estudio pero al mismo tiempo es el más rápido de realizar, es apto para todo tipo de materiales a diferencia del ensayo Brinell sus identadores son más pequeños y las huellas son inapreciables.

El ensayo Vickers a comparación de otros ensayos se puede realizar en espesores más delgados hasta de 0.2 mm, puede realizarse en materiales con superficies esféricas o cilíndricas así mismo puede ser usado en materiales blandos y duros este ensayo es más sensible para realizar el cálculo de la dureza de los materiales.

El ensayo Brinell se realiza con un identador de bola de acero templado o de carburo de tungsteno, el cual deja una huella con forma de casquete esférico, el tamaño de la bola identadora se elige en función del espesor de la probeta a ensayar para esto se consultan las tablas, para una mayor definición de la dureza Brinell se especifica en la norma ASTM E 10-78 [23].

Para estos ensayos se utiliza una maquina denominada durómetro.

Los ensayos de dureza para este proyecto se realizaron en un durómetro Dura Scan de la marca emco-TEST con una escala en Vickers, el cual se muestra en la figura 59, con 0.5HV de carga durante 5 segundos con un identador de diamante con forma de

pirámide. Los ensayos que se realizaron un total de 6 identaciones por muestra en las diferentes fases para obtener un promedio para cada composición.



Figura 59 Durómetro Emco-Test para ensayos de dureza.

Para poder realizar estos ensayos se debió preparar la probeta previamente de acuerdo a la norma ASTM E384.

2.8.3 Ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga es un método para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas fluctuantes. Para poder realizar este ensayo se aplica a una probeta una carga media especificada (que puede ser cero) y una carga alternativa y se registra el número de ciclos requeridos para producir un fallo (vida a la fatiga).

Los datos procedentes de los ensayos de fatiga se presentan en un diagrama S-N, que es un gráfico del número de ciclos necesarios para provocar un fallo en una probeta frente a la amplitud del esfuerzo cíclico desarrollado.

La mayoría de los ensayos de fatiga se realizan en máquinas de flexión, de vigas rotativas o de tipo vibratorio. Y este tipo de ensayo se describe en "Manual on Fatigue Testing", ASTM STP 91-A y "Mechanical Testing of Materials", A.J. Fenner, Philosophical Library, Inc. ASTM D-671 describe un procedimiento estándar del ensayo de fatiga de los plásticos en flexión.

2.8.4 Ensayo de impacto

Otra prueba mecánica que nos sirve para evaluar las propiedades de los materiales es el ensayo de impacto, su objetivo es determinar la Tenacidad de los mismos. Definimos como tenacidad a la propiedad que tiene un material de absorber energía hasta el punto de ruptura, cuando es sometido a esfuerzos de choque o golpes [24].

Existen dos métodos para realizar ensayos de Impacto:

- Método Charpy en el cual el espécimen a probar es colocado en sentido horizontal sobre la sección de prueba y el impacto se aplica por la parte posterior a la ranura, este método es el más comúnmente utilizado.
- Método Izod en este, el espécimen a probar se coloca en sentido vertical sobre la sección de prueba y el Impacto lo recibe por la cara en la cual está colocada la ranura.

La prueba de Impacto se realiza de acuerdo con la especificación A.S.T.M. E23-16B la cual establece tres diferentes tipos de probeta en cuanto a la preparación de la ranura:

- Tipo A (Ranura en V)
- Tipo B (Ranura cerrojo de llave)
- Tipo C (Ranura en U)

CAPÍTULO III RESULTADOS

En este capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos de este proyecto comparando algunas de las propiedades un acero de medio carbono (38) con el acero obtenido. Por medio de su composición química la cual se conoce a través del cálculo de carga que se realiza antes de fundir.

3.1.- Análisis químico y metalográfico de los aceros fundidos tipo 38MnV11+Ca y un lote de acero titular (38MnVS) para certificar calidad.

Se realizó el análisis químico y metalográfico de los aceros fundidos tipo 38MnV11+Ca con el objetivo de asegurar la composición química deseada. Para el análisis químico se tomó una muestra de metal líquido durante el proceso de vaciado, para lo cual se fabricó una pequeña capsula metálica de 3.5 cm de diámetro y 4.0 cm de longitud para lograr un efecto chill y obtener una mezcla homogénea de la aleación. Para el análisis metalográfico se tomaron muestras de los aceros en estado de colada para valorar la estructura en cuanto a fases presentes, tipo, tamaño, forma y distribución de las inclusiones no metálicas presentes. Se realizó un estudio de segregación en la estructura. Se realizaron pruebas preliminares de deformación para determinar temperaturas y tiempos de permanencia para homogeneizar la estructura.

Un aspecto de particular interés en el análisis químico de las fundiciones realizadas fue la de obtener información sobre las diferentes materias primas utilizadas para fabricar estos aceros debido a la variedad de chatarra utilizada lo cual altera la composición química final, pues en general, se tiene un mayor contenido de manganeso en cada uno de ellas (0.9%), la razón es que es un fuerte formador de perlita lo que permite aumentar la resistencia a la tensión de varios aceros. Otros elementos que vienen a alterar la composición química de los aceros fabricados son el cobre, titanio y vanadio. De estos el cobre también es utilizado como formador de perlita y aumentar la resistencia a la corrosión. El titanio, en varias chatarras utilizadas se detectó en contenidos de hasta 0.04%, afectando la estructura y propiedades mecánicas de los aceros fabricados. Los contenidos de vanadio fueron mayormente de forma residual 0.005% sin llegar a alterar los contenidos estimados para cada fundición.

La Tabla 9 presenta los contenidos de la composición química para un acero tipo 38MnVS y el obtenido en los aceros fabricados. La Tabla 10 presenta uno de los análisis de la composición química.

Tabla 11 Resultados Promedio de los análisis químicos de los aceros fundidos

Elemento	%peso (promedio)	%peso (Límite máximo y mínimo permitido para un 38MnVS)	% peso Resultados obtenidos
Carbono	0.38	0.36-0.40	0.36
Manganoso	1.17	1.00-1.35	1.25
Silicio	0.57	0.50-0.65	0.52
Cobre	0.25	Máx.	0.22
Cromo	0.15	0.10-0.20	0.16
Níquel	0.15	Máx.	0.15
Azufre	0.57	0.050-0.065 (nivel industrial ≤0.065 (nivel laboratorio)	0.035
Aluminio	0.03	Máx.	0.025
Nitrógeno	0.015	0.013-0.017	-----
Fosforo	0.02	Máx.	0.001
Molibdeno	0.05	Máx.	0.03
Vanadio	0.11	0.08-0.12	0.11
Titanio	0.08	0.04-0.08	0.065
Calcio	0.04	0.04 -0.06	0.042

Los resultados de la composición química (Tabla10) demuestran que se cumple con la estimada en el proceso de fundición, así también se concluye que utilizando chatarras de aceros de medio carbono favorece estos resultados positivos. En este caso, los contenidos de azufre fueron apropiados para cuestiones de maquinabilidad y el análisis del efecto de las adiciones de calcio en la modificación de las inclusiones tipo MnS. De forma similar, los contenidos de manganoso permitieron evaluar su efecto en los contenidos de perlita y ferrita.

Tabla 12 Resultados de los análisis químicos de los aceros fundidos.

ARUN-TECHNOLOGY											6/17/2016 1:05:21 PM	
Sample Identification												
Sample			Muestra					UAEH				
No.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	0.37	0.53	1.26	0.02	<0.15	0.17	0.35	0.12	0.25	0.02		
Ø 2	0.36	0.52	1.25	0.02	<0.15	0.16	0.35	0.13	0.25	0.02		
3	0.35	0.53	1.27	0.02	<0.15	0.18	0.35	0.12	0.25	0.02		
	0.36	0.53	1.25	0.02	<0.15	0.17	0.35	0.12	0.25	0.02		
	As	B	Ca	Ce	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	0.009	0	0.03	0.01	0.01	0.011	0.04	0	0	0	0	
Ø 2	0.009	0	0.06	0.01	0.01	0.007	0.04	0	0	0	0	
3	0.009	0	0.07	0.01	0.01	0.005	0.04	0	0	0	0.01	
	0.009	0	0.05	0.01	0.01	0.008	0.04	0	0	0.01		
	Sn	Ta	La	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	0.005	0.03	0	0.09	0.1	0.018	0.01	0	0.01	97.4		
Ø 2	0.005	0.03	0	0.07	0.11	0.01	0.01	0	0.01	97.5		
3	0.005	0.03	0	0.07	0.11	0.012	0.01	0	0.01	97.6		
	0.005	0.03	0	0.07	0.11	0.013	0.01	0	0.01	97.5		

3.2 Análisis metalográfico

La teoría tradicional de la solidificación nos dice que el hierro presenta una solubilidad menor que el carbono, esto significa que durante la solidificación del acero, el metal líquido remanente delante del frente de solidificación se va enriqueciendo de carbono en conjunto con los elementos aleantes, los cuales, una vez terminada la solidificación, presentan una distribución des-uniforme en el lingote, dando origen a la segregación. Los elementos segregados en el frente de solidificación, se distribuyen paulatinamente mediante difusión y convección en el metal líquido, por lo tanto, mientras el frente avanza, delante de él, la concentración de soluto aumenta permanentemente, este enriquecimiento de soluto continua hasta que alcanza valores suficientemente altos como para formar nuevas fases.

Se realizó un análisis metalográfico de los aceros en estado de colada y a la temperatura de forja así como a 800°C y forjados. Además se realizó un estudio de segregación en condiciones de colada con análisis químico mediante EDS.

En Figura 60 se muestra un mapeo conformado por 35 microfotografías, de una sección de los lingotes colados. En el área **A1**, se muestra una sección del lingote que es adyacente a la pared de la lingotera, se aprecian granos columnares de ferrita, y en contraste, en el área **A2**, se muestra la estructura del centro del lingote, donde se formaron preferentemente granos equi-axiales lo que indica una rápida solidificación y que favorece una estructura más homogénea. La Figura 61 muestra la microestructura formada por ferrita y perlita. Aunque algunos granos se muestran de gran tamaño, se analizó que estos están conformados por la unión de dos o tres granos pero por su tamaño, no es posible visualizar el límite entre cada uno. Por el contrario, la Figura 62 muestra los granos columnares que se formaron en la sección pegada a la pared de la lingotera y que sin embargo, se tiene una capa de sobre material (8 mm) que será removida por maquinado lo que permite forjar el lingote con la microestructura de granos equi-axiales.

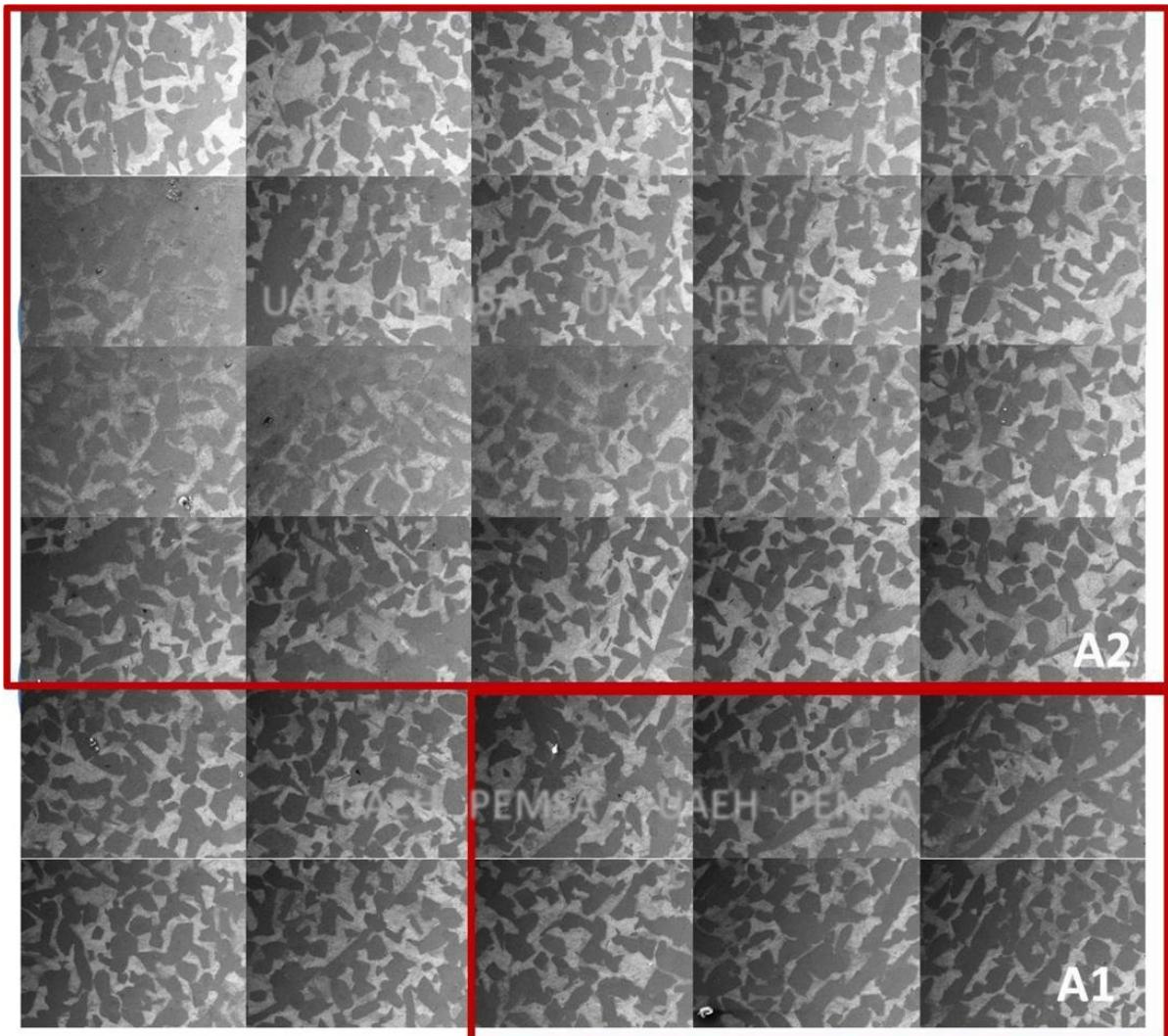


Figura 60 Mapeo de una sección del lingote de acero MnV11S+Ca

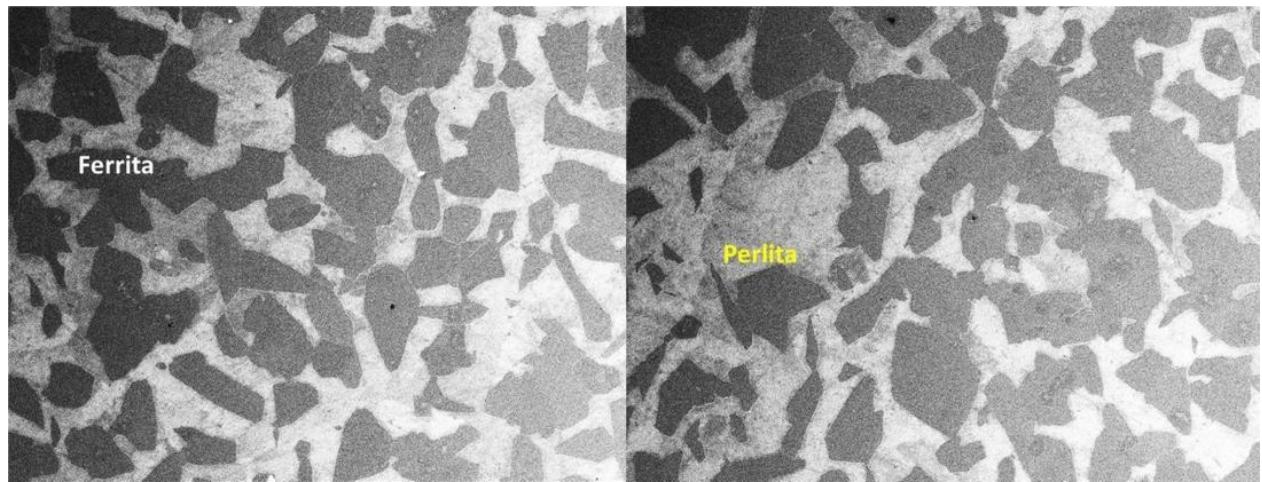


Figura 61 Microestructura conformada por ferrita – perlita del acero en estado de colada.

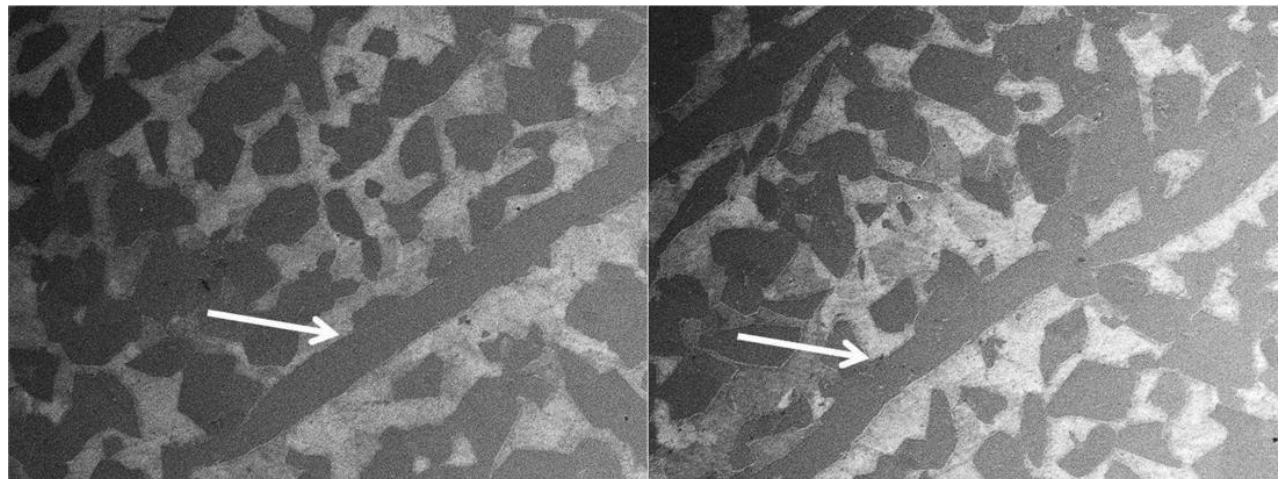


Figura 62 Microestructura del acero en estado de colada, se observan granos columnares

En la figura 63 observamos la fase perlita del acero en estado de colada, donde se pueden apreciar s inclusiones embebidas en dicha fase.

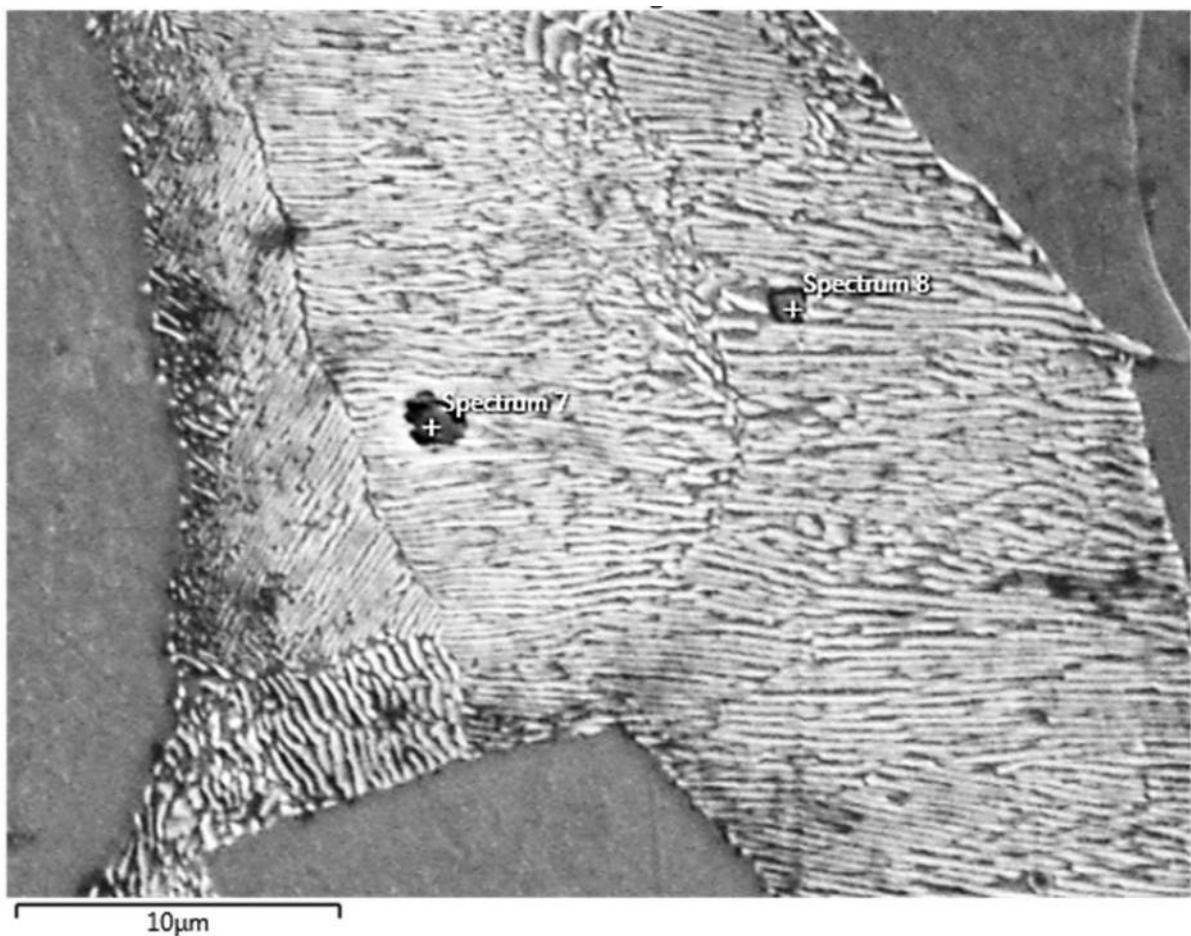


Figura 63 Fase Perlita del acero en estado de colada, se observan dos inclusiones embebidas en la fase.

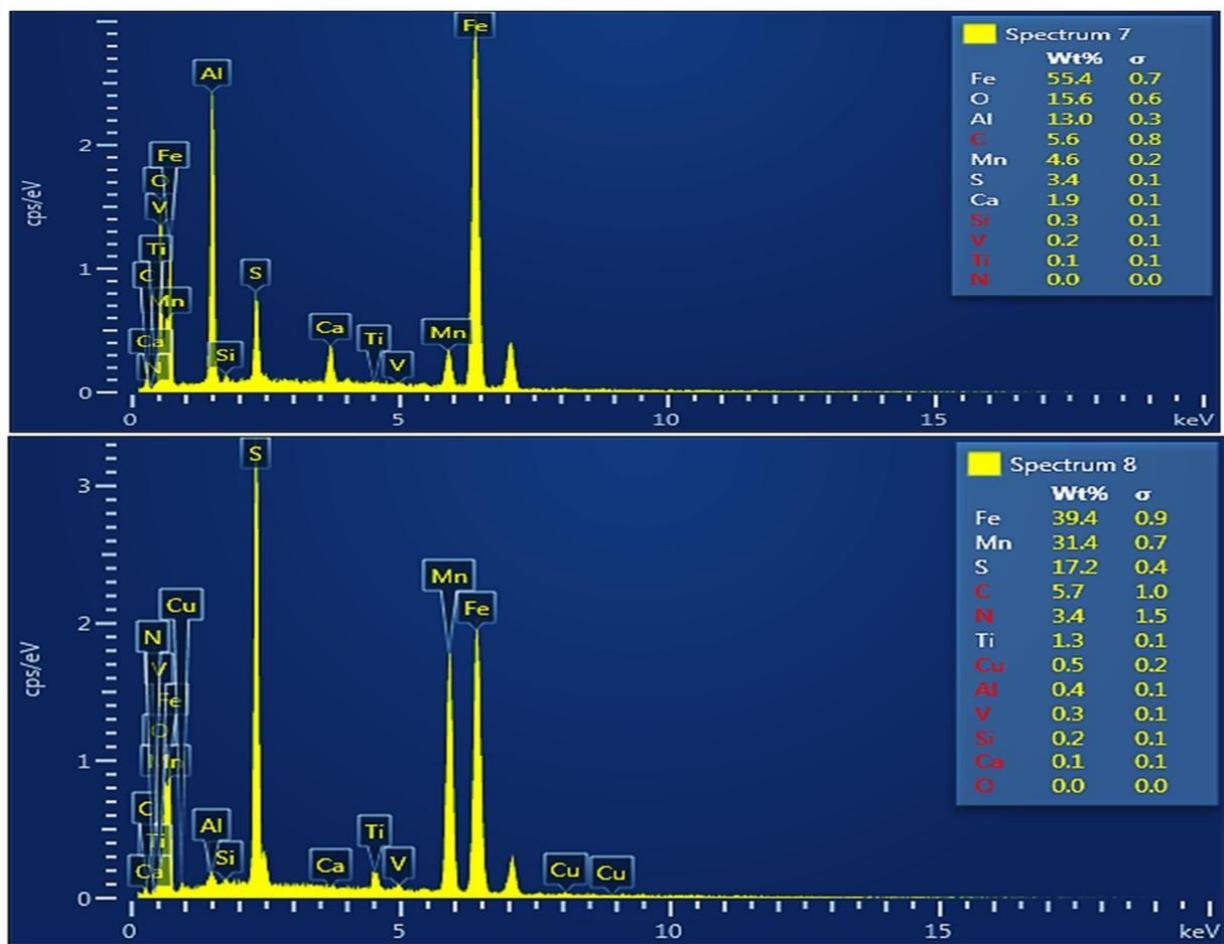


Figura 64 Análisis por EDS de un aluminato (spectrum 7) y de una inclusión de MnS (spectrum 8) encontradas en la Perlita del acero en estado de colada.

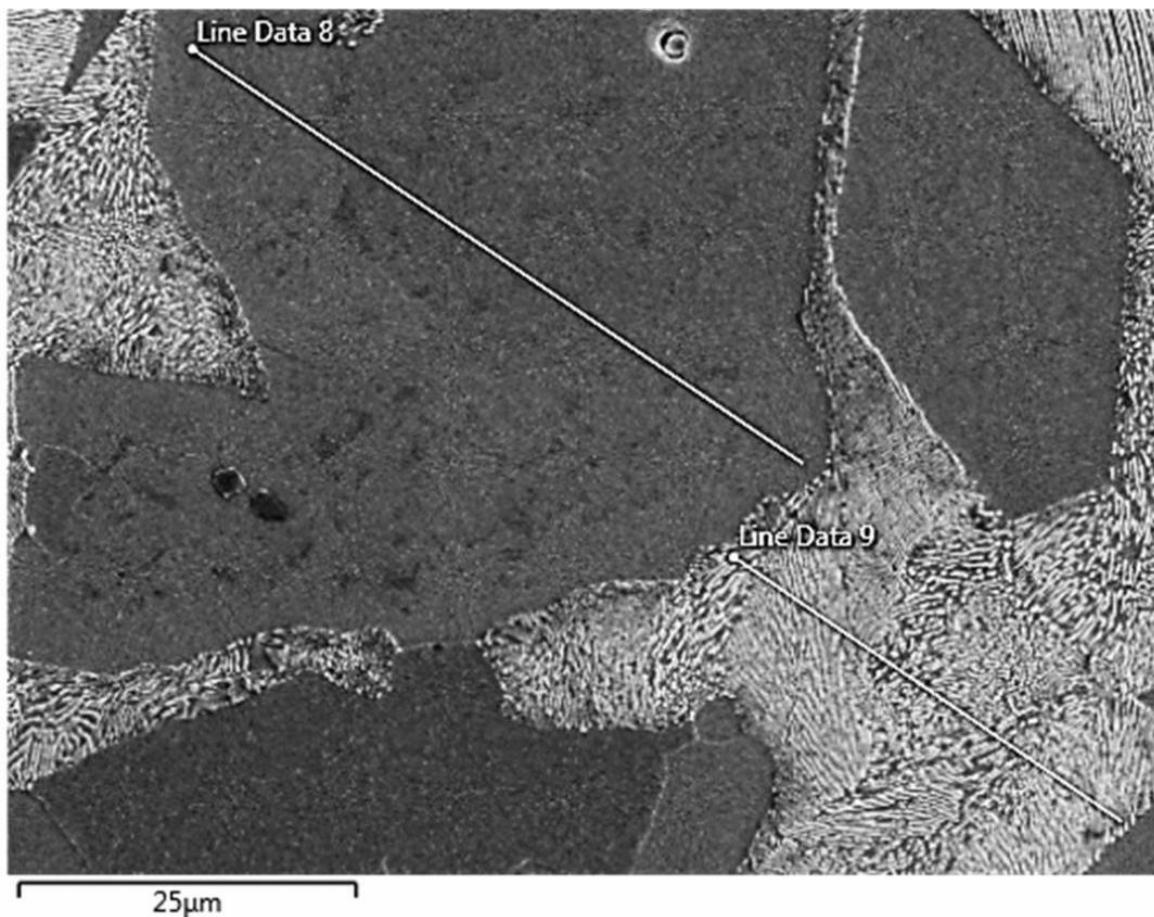


Figura 65 Fase Perlita - Ferrita del acero en estado de colada, se aplicó un EDS – line scan en cada fase

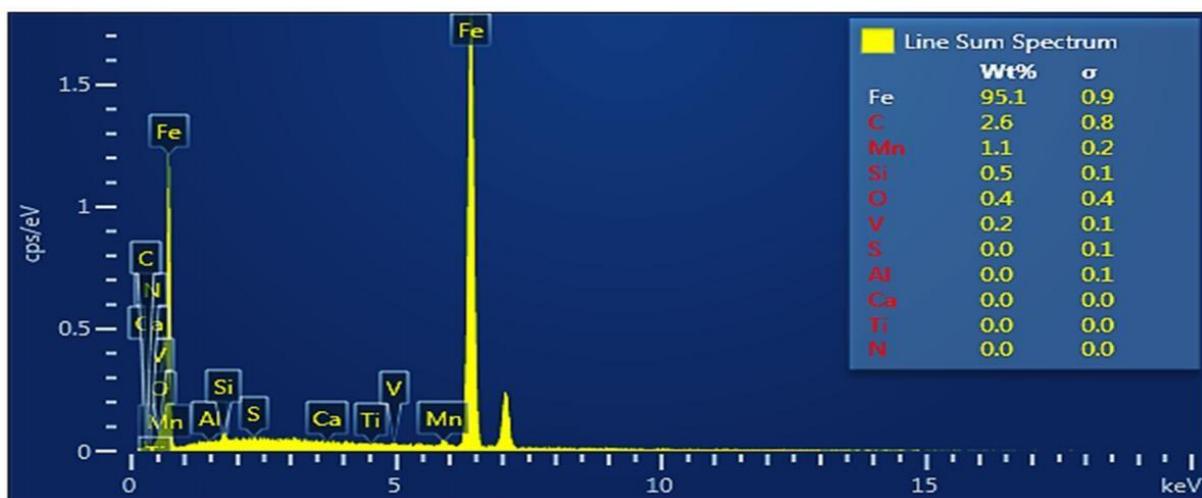


Figura 66 EDS – line scan aplicado en la fase ferrita del acero en estado de colada.

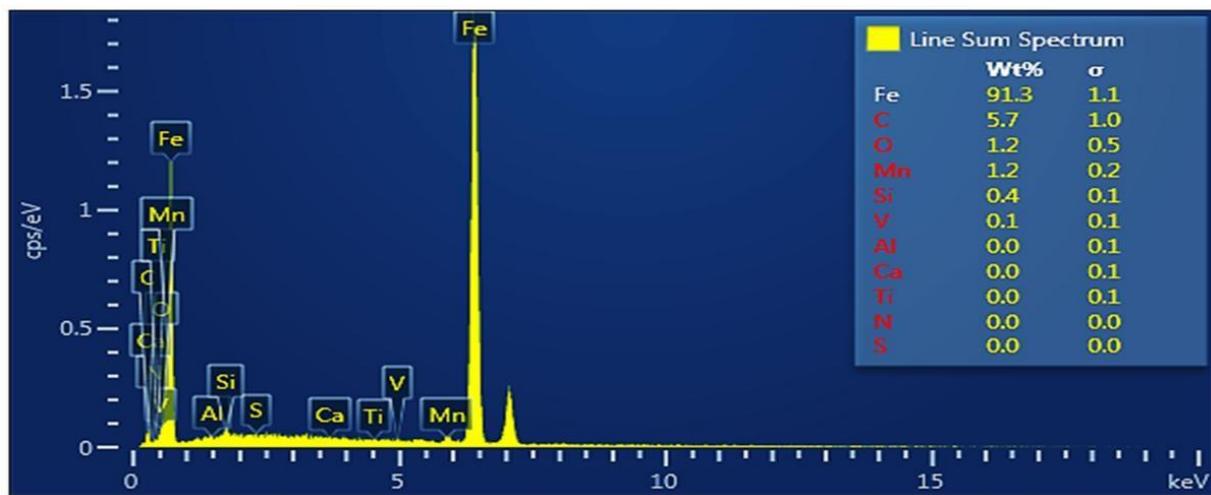


Figura 67 EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada.

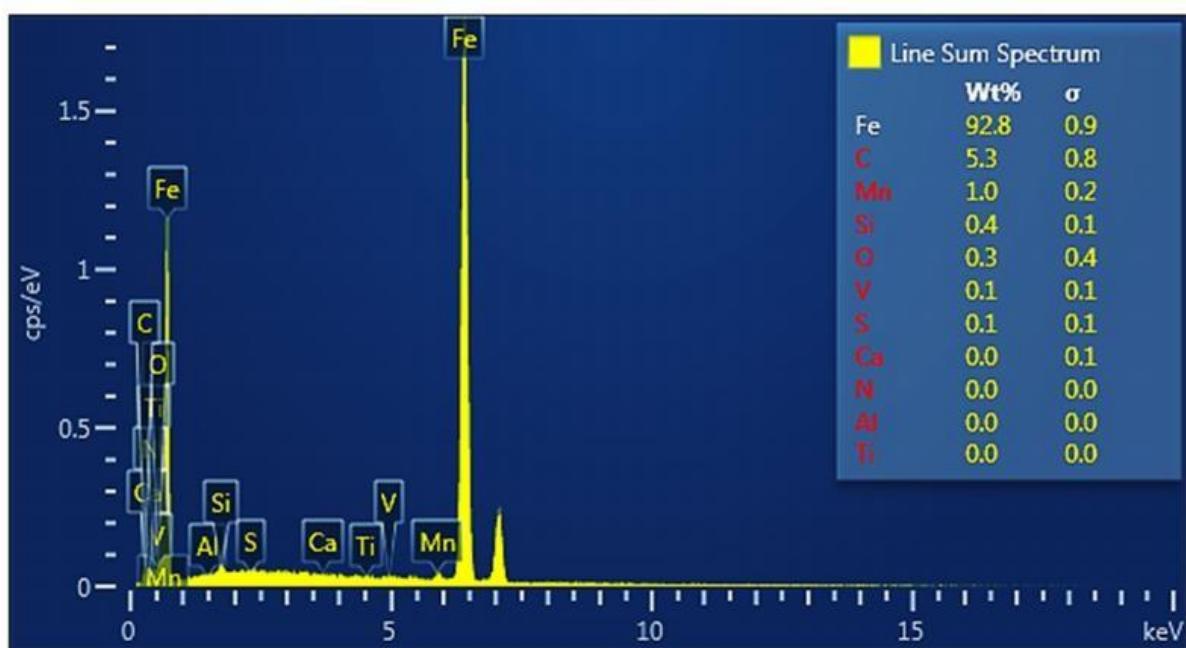
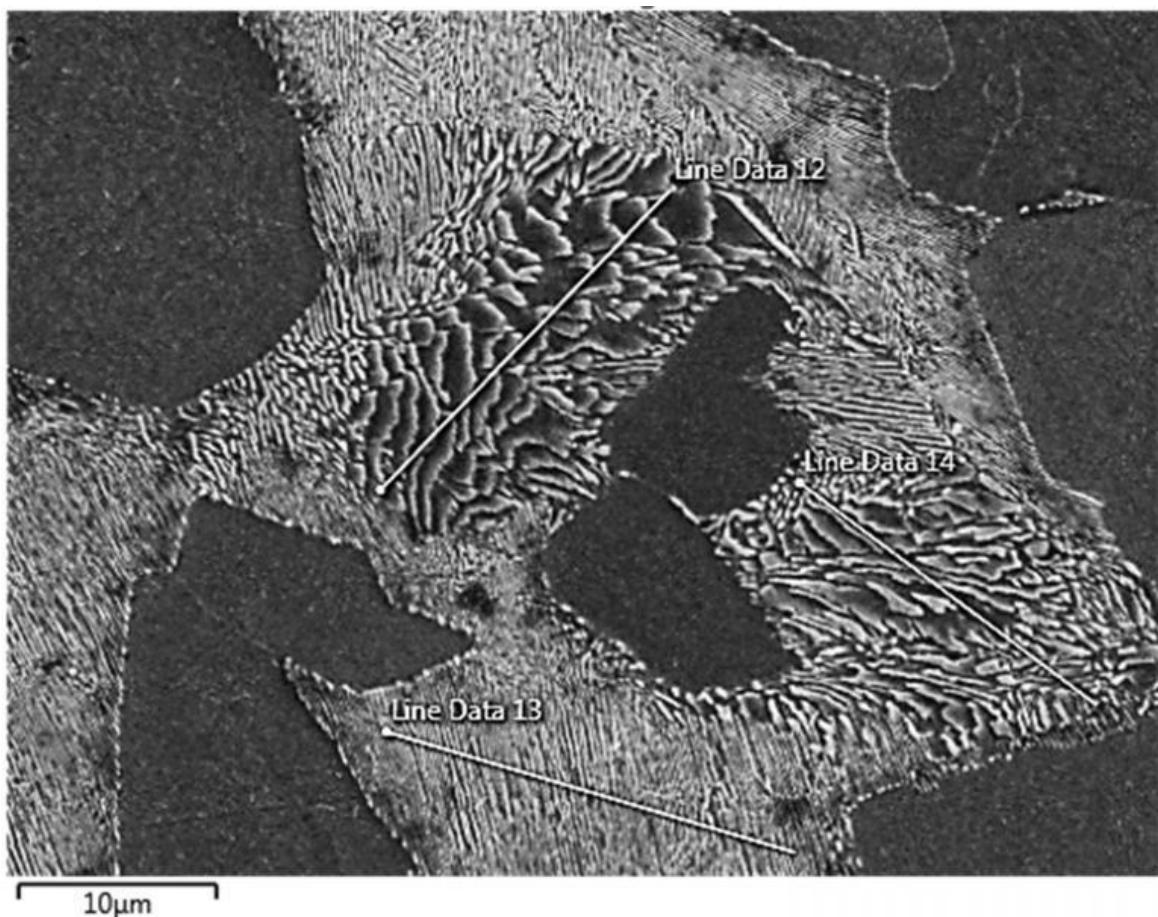


Figura 68 EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada

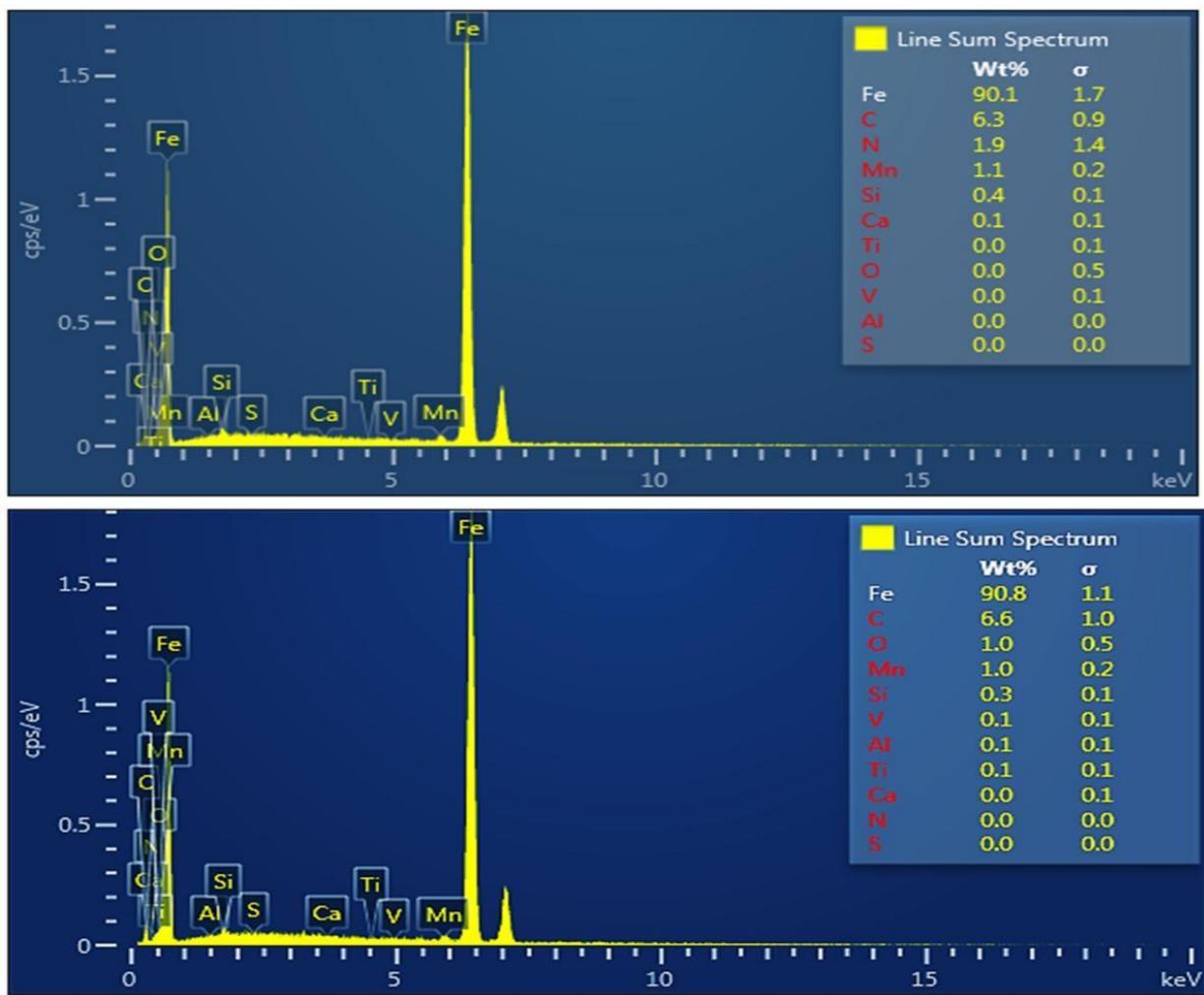


Figura 69 . EDS – line scan aplicado en la fase perlita del acero en estado de colada.

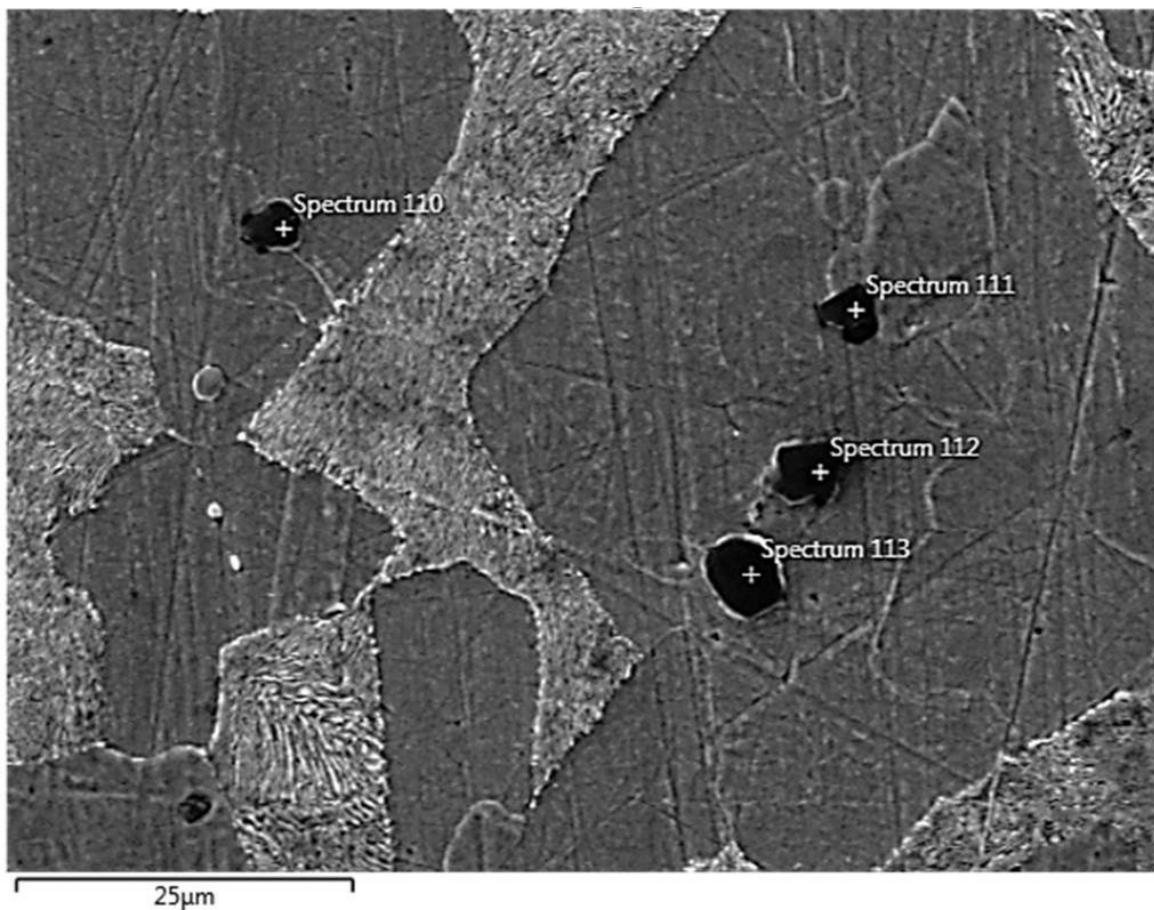


Figura 70 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase

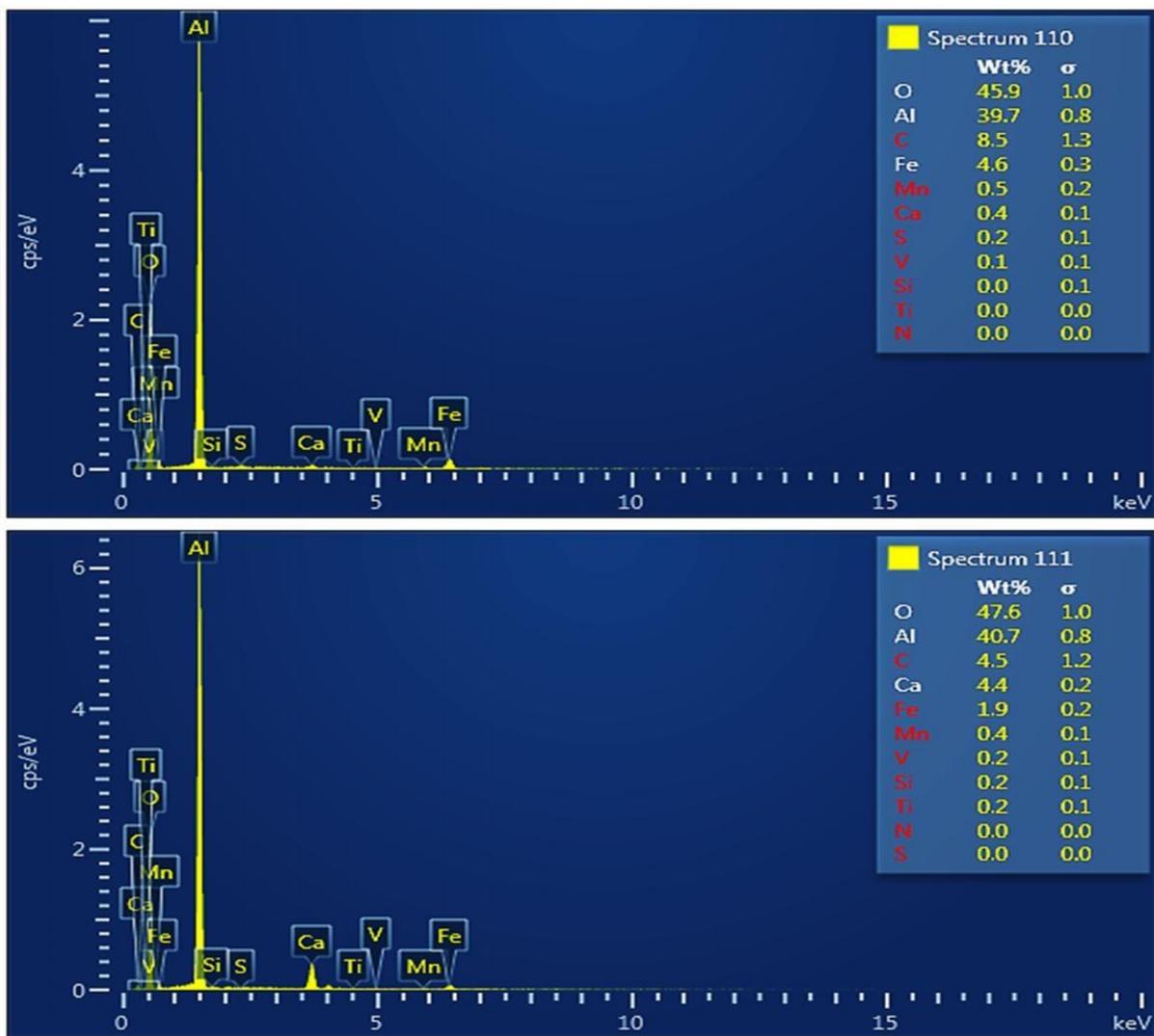


Figura 71 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica

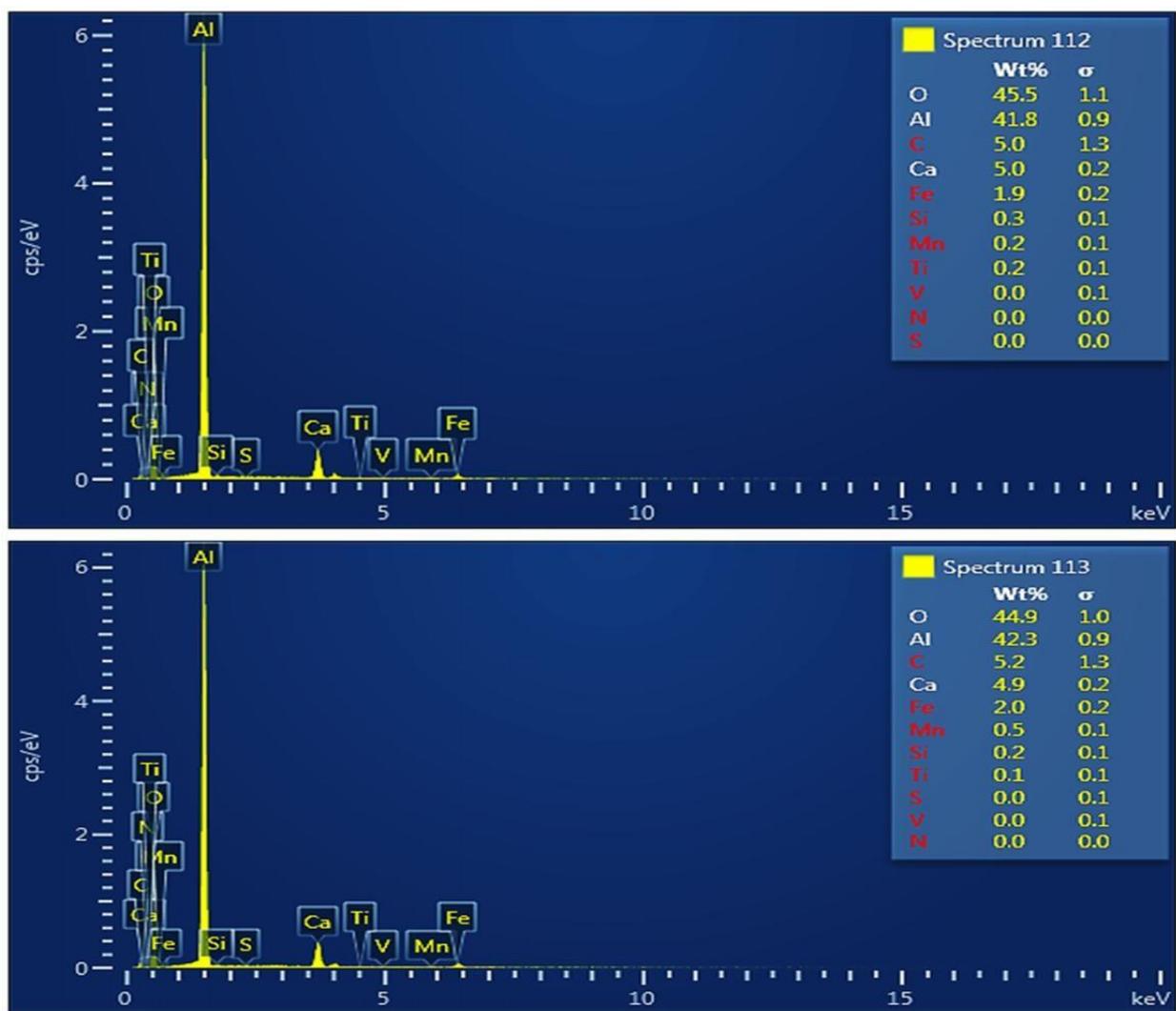


Figura 72 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.

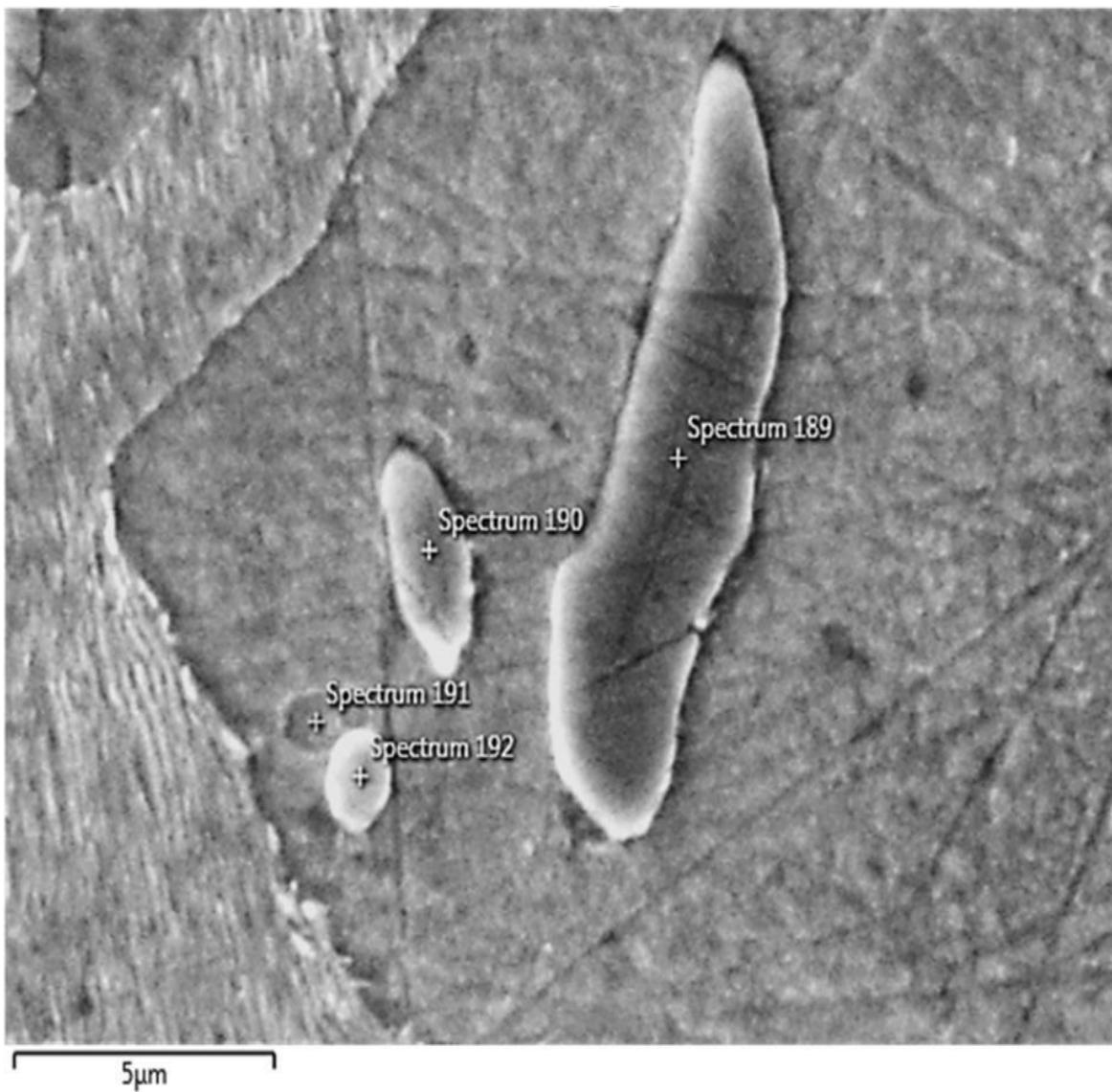


Figura 73 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferritica

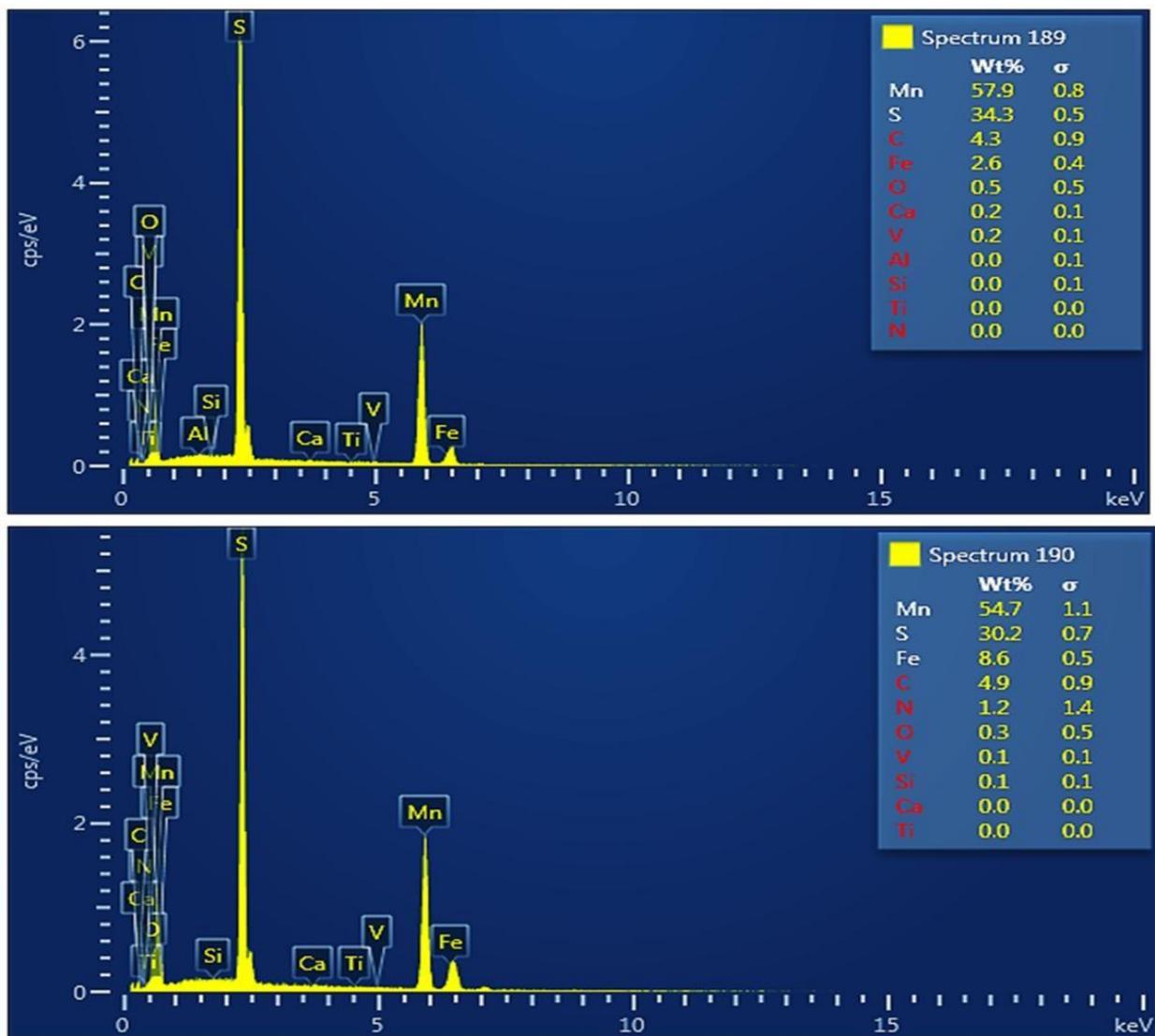


Figura 74 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica

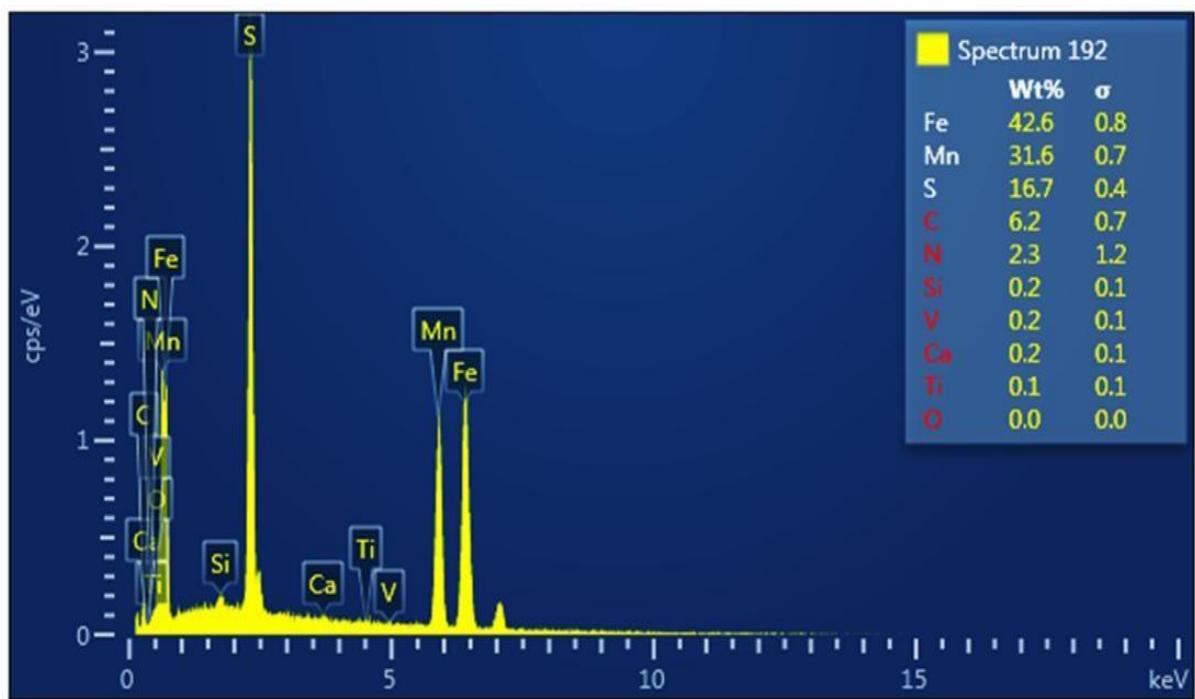
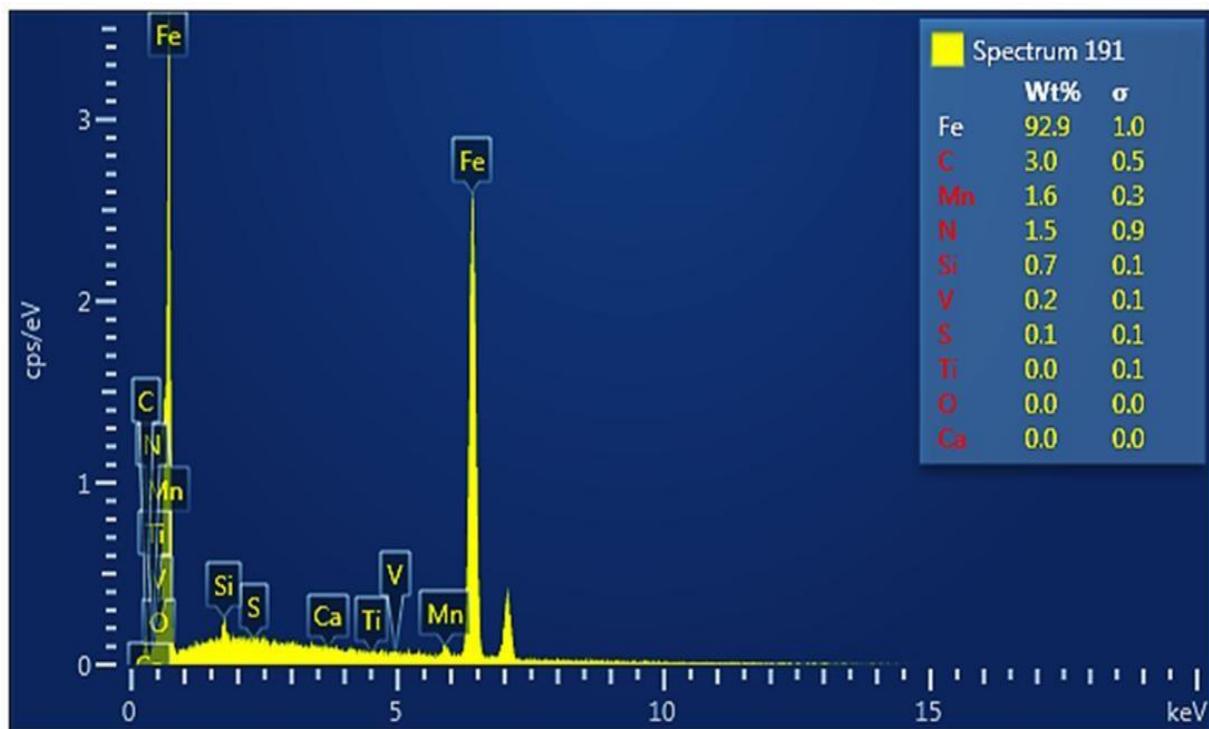


Figura 75 EDS aplicado a inclusiones localizadas en la fase ferrítica.

3.3. Tratamiento térmico de homogenización

Se realizó un tratamiento térmico de homogenización en probetas de los aceros colados para determinar la temperatura y tiempo de permanencia a los cuales se logra una homogenización aceptable de la microestructura. El ciclo térmico se muestra en la Figura 76 y los resultados en la Figura 77.

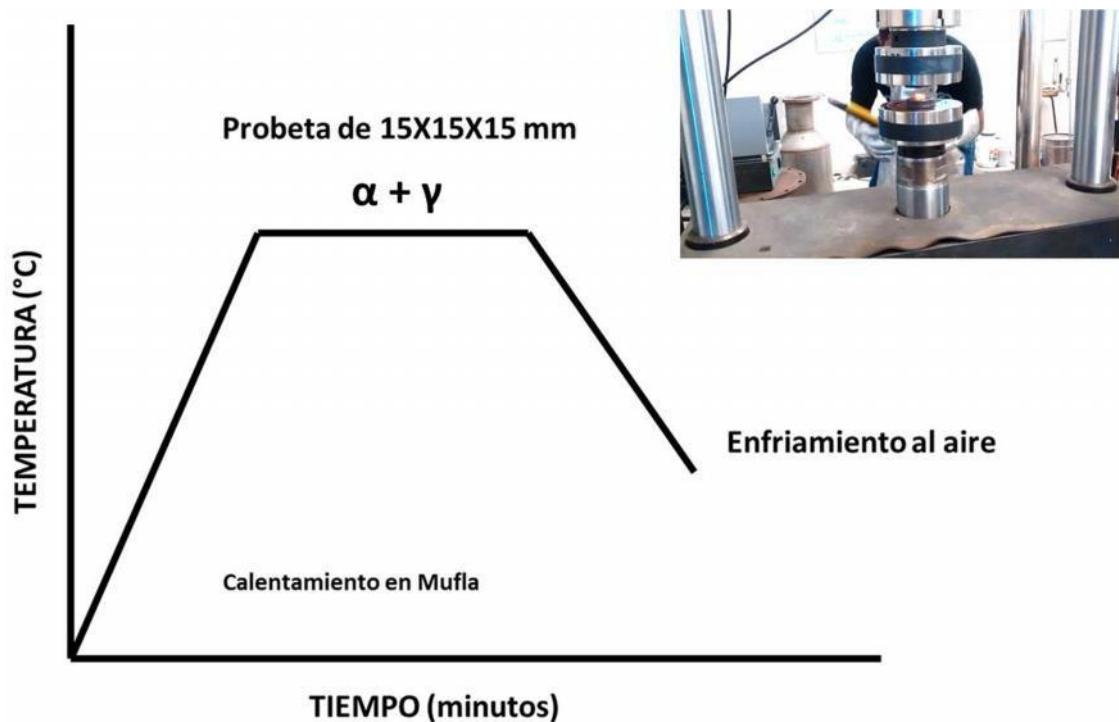


Figura 76 Tratamiento térmico de homogenización con deformación en la zona ferrita – perlita aplicada a los aceros colados.

TEMPERATURA DE RECALENTAMIENTO: 900°C

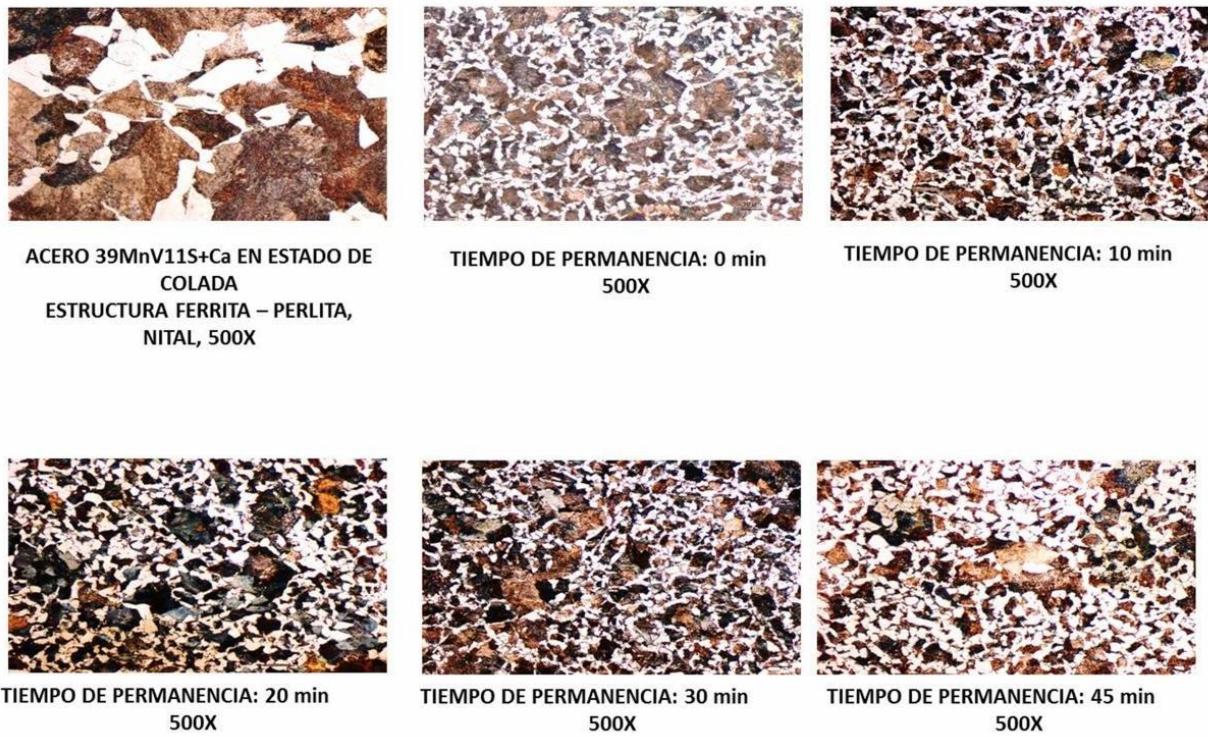


Figura 77 Cambio microestructural del acero colado a 900°C

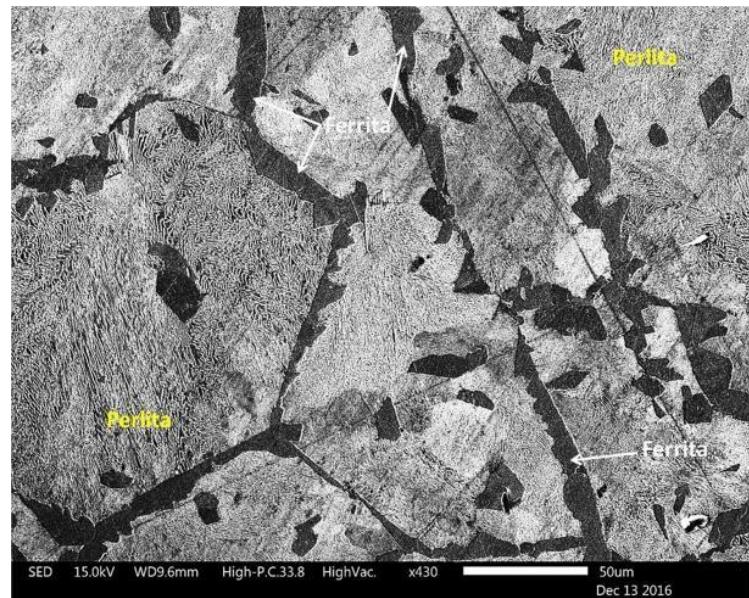


Figura 78 Microestructura de acero 38MnV11S+Ti forjado, Ferrita-Perlita

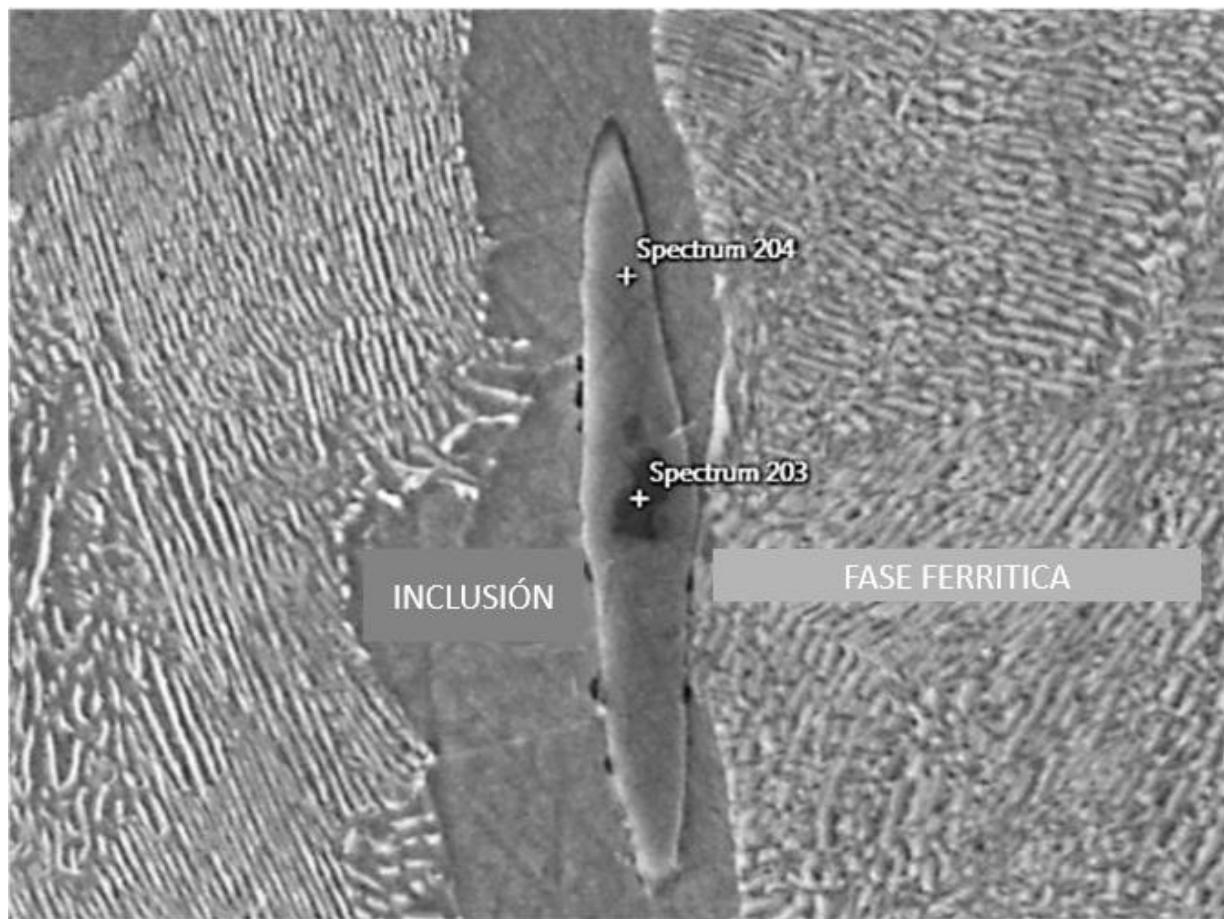


Figura 79 Inclusión compleja en fase Ferrita del acero 38MnV11S+Ti forjado

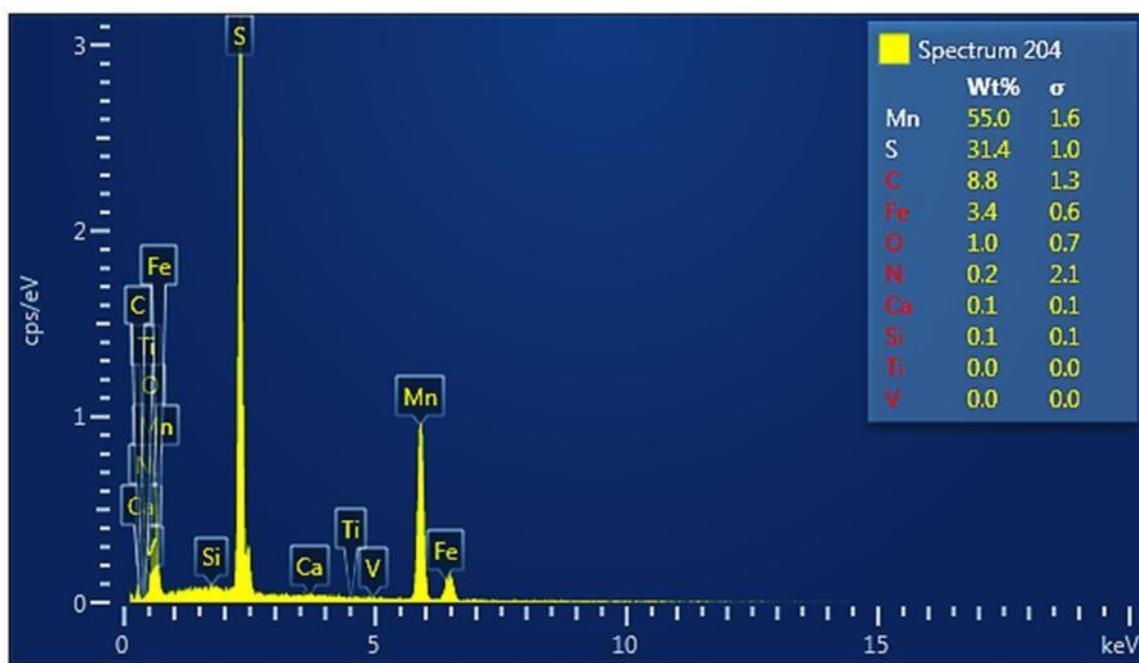
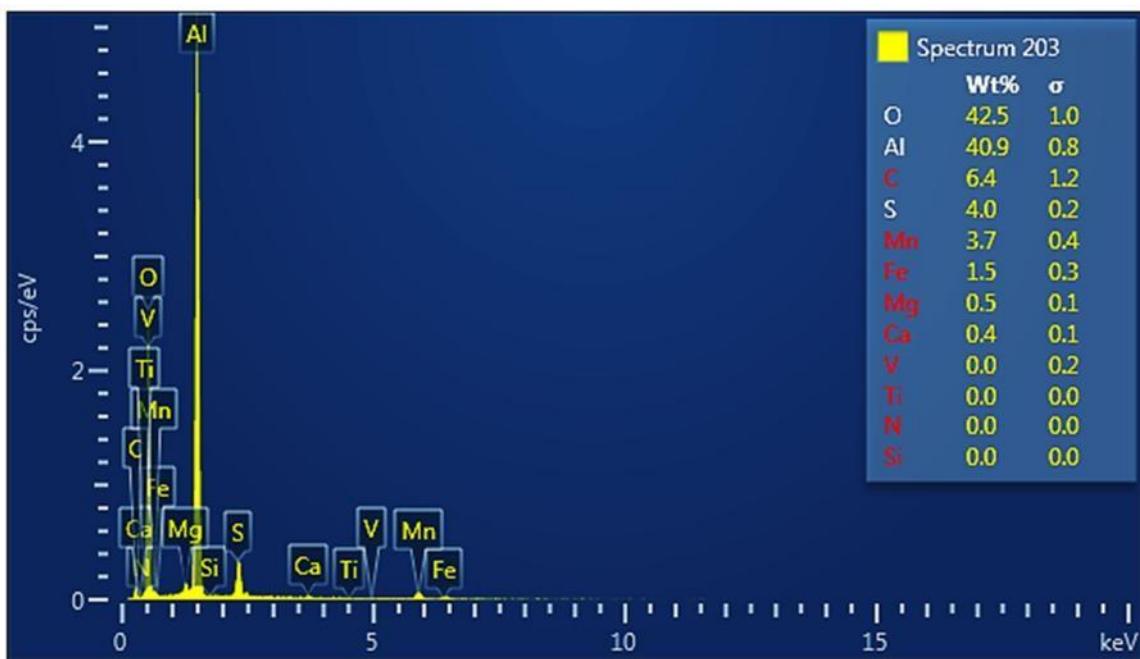


Figura 80 EDS - Inclusión compleja en fase Ferrita del acero 38MnV11S+Ca forjado

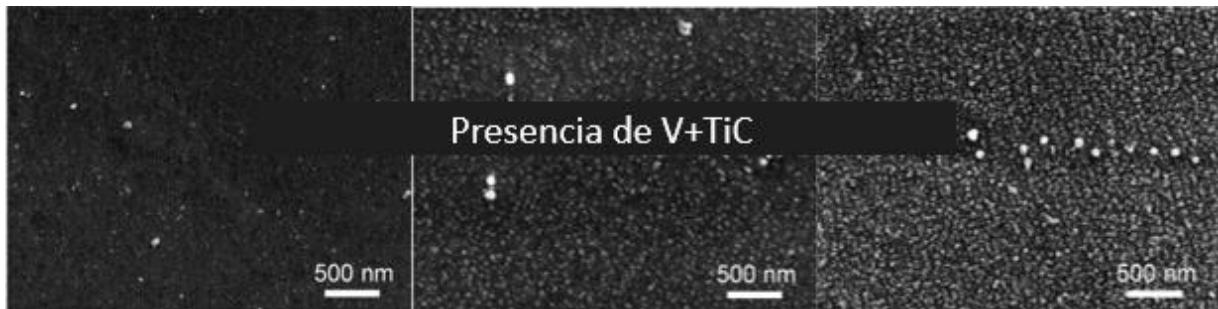


Figura 81 Presencia de VC + TiC en la matriz ferrítica de los aceros colados 38MnV11S+Ca.

Tabla 13 Fases presentes, tamaño de grano, inclusiones y precipitados de los aceros colados y titular

Acero	Condiciones	%Ferrita	%Perlit a	Tamaño grano (ASTM)	Tipo inclusión	Precipitado s VC
38MnV11S+Ti	Colado + Forjado	55	45	7	MnS + Al Mn S	Distribuidos en ferrita
	Colado + Rolado + Forjado	85	15	7-8	MnS + Al Mn S	Distribuidos en ferrita

3.4 Manufactura de lingotes como materia prima en dimensiones para forja industrial

En términos generales, el maquinado es un proceso de manufactura en el cual, se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el remanente sea la forma deseada. La acción predominante involucra la deformación en cortante del material de trabajo, lo que produce viruta, la cual al ser removida queda expuesta la nueva superficie. Para el maquinado de los aceros fabricados, una vez que el lingote solidificó en la lingotera metálica, se procedió a su corte en sierra cinta donde se cortó 18 cm para eliminar el rechuve para posteriormente ser sacado de la lingotera y proceder a su maquinado. Para obtener el tamaño final de maquinado (38.8 cm x 8.89Ø) se utilizó un torno horizontal tradicional. Referente a la vida útil de la herramienta de corte, se realizaron maquinados en aceros

38MnVS (titular) con buriles de cobalto, requiriendo un re-afilado después de desbastar

0.3 mm, sin embargo, para los aceros 38MnV11S+Ti, utilizando esta misma herramienta solo se desbastó 0.1 mm y se requirió un re-afilado inmediatamente, motivo por el cual se utilizó un buril con inserto de carburo de tungsteno con el cual se pudo terminar hasta cinco lingotes sin re-afilarse. La contracción del lingote después de solidificar fue de un 10%. El proceso de maquinado se muestra en las siguientes fotografías.



Figura 82 Fundición y corte de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti



Figura 83 Corte y extracción de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti



Figura 84 Corte y extracción de lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti



Figura 85 Maquinado burdo de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti



Figura 86 Maquinado burdo de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti



Figura 87 Maquinado fino y de ajuste a medida de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ca



Figura 88 Maquinado final de los lingotes de acero colados 38MnV11S+Ti

3.5.- Maquinado de probetas para ensayos mecánicos para determinar la calidad y desempeño de cigüeñales forjados con aceros tipo 38MnV11+Ti

A nivel ingeniería, la mayoría de los materiales cuando están en servicio están sujetos a fuerzas o cargas. En tales condiciones conocer las características del material para diseñar el equipo o pieza donde va a usarse de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture. El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.

Para los ensayos de tensión y fatiga se obtuvieron probetas de la nariz del cigüeñal

forjado con aceros 38MnV11S+Ti. El corte fue demasiado preciso debido al tamaño y forma de la sección de la nariz, permitiendo maquinar las probetas sin problema. Para las probetas Charpy, se obtuvieron de la sección del plato sin mayores problemas. Los ensayos de tensión y fatiga fueron realizados a temperatura ambiente, mientras que los ensayos charpy fueron a diferentes temperaturas. Los resultados se presentan en las siguientes fotografías y tablas. Los resultados mostrados son promedios del total de ensayos realizados.



Figura 89 Corte de cigüeñal para el maquinado de probetas de tensión, Charpy y fatiga de acero forjado 38MnV11S+Ti



Figura 90 Probetas para ensayo de fatiga de aceros forjados 38MnV11S+Ti

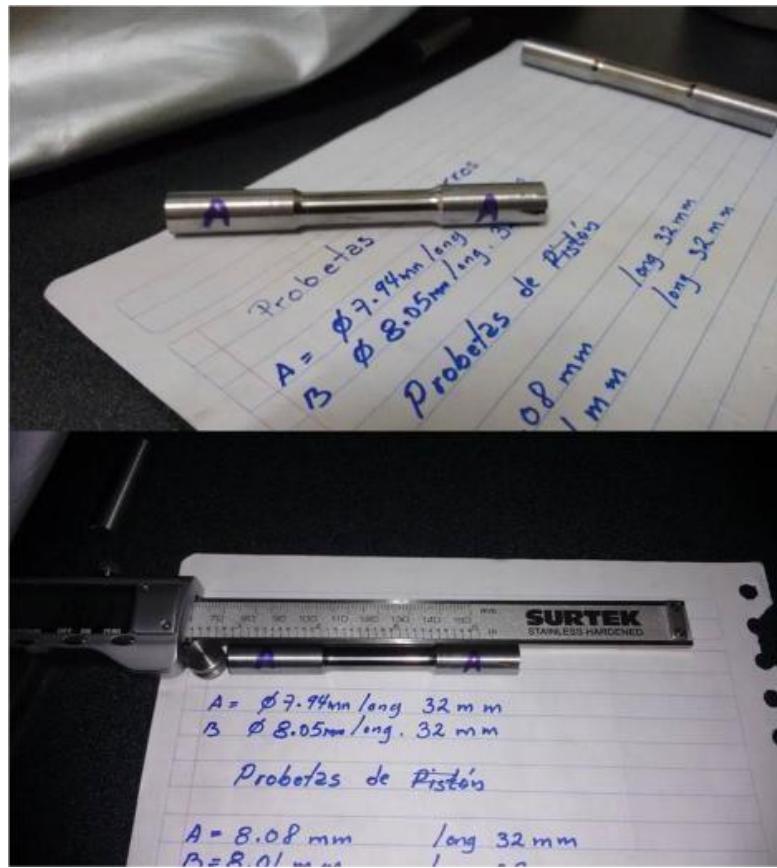


Figura 91 Probetas para ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ti

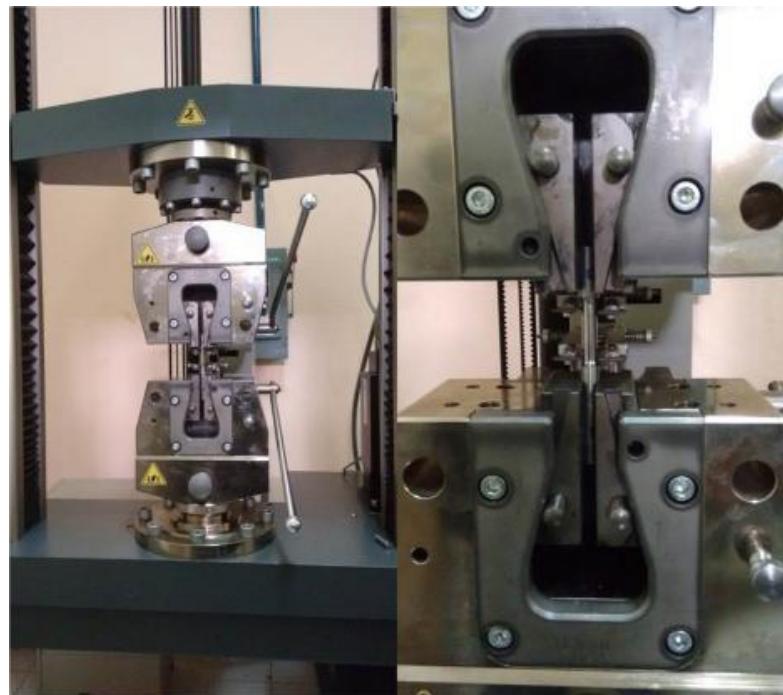


Figura 92 Ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ti

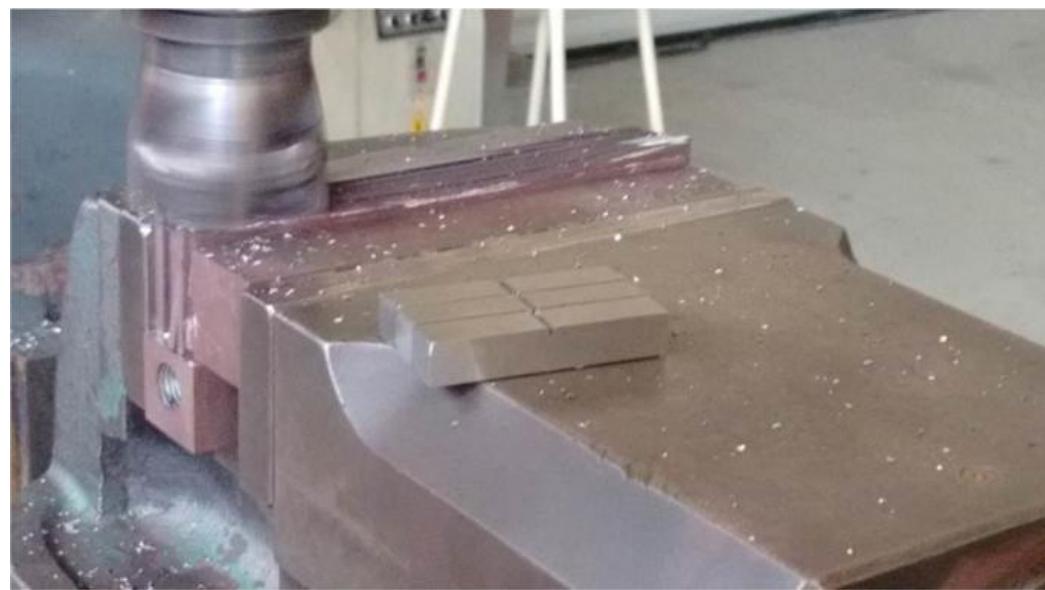


Figura 93 Maquinado de probetas para ensayo Charpy de aceros forjados 38MnV11S+Ti

Tabla 14 Resultados del ensayo de Tensión

Acero	Condiciones	R _t (MPa)	R _c (MPa)	%elongación
38MnV11S+Ti		890	635	10.5
		860	620	10
	Colado + Forjado	880	628	9.7
		885	621	11
		887	618	12
		906	639	8.6
38MnVS-Comercial		935	647	12
		955	647	13.9
	Colado + Rolado +	901	769	7
		903	625	6

Tabla 15 Resultados del ensayo de Fatiga

Acero	Condiciones	Resistencia a la Fatiga (Mpa)	Número de Ciclos
38MnV11S+Ti		420	300000
		400	300000
	Colado + Forjado	420	300000
		422	300000
		430	300000
		340	300000
38MnVS-Comercial		335	300000
		342	300000
		360	300000
		348	300000

Tabla 16 Resultados del ensayo de Charpy

Acero	Condiciones	Energía Absorbida (Joule)		
		-10°C	23°C	100°C
38MnV11S+Ti		3	18	32
		5	15	24
	Colado + Forjado	5	20	30
		1	19	36
		3.5	13	28
38MnVS-Comercial		4	12	18
		1	17	30
	Colado + Rolado +	2.5	10	17
		6	8	12
		4	9.5	25

Nota: Las probetas a -10°C fueron enfriadas con un serpentín y alcohol, las probetas ensayadas a 100°C fueron calentadas en aceite automotriz.

3.6. Estudios de fractografía en muestras de tensión, fatiga y charpy para determinar el modo de falla

Conceptualmente, la fractografía es el método por el cual se realiza el análisis de las características de la fractura de un material para conocer sus causas y mecanismos de falla. En casos particulares, se puede llegar a predecir la iniciación de la grieta, crecimiento de la grieta y el factor que produjo la fractura.

En este sentido, la importancia de determinar el modo de fractura en los aceros experimentales tipo 38MnV11+Ca y titular radica en la necesidad de mejorar u optimizar su proceso de fabricación desde su diseño químico hasta su terminación como producto final (cigüeñal). Las condiciones económicas a nivel nacional e internacional afectan el abasto de la materia prima para fabricar estos aceros y se desea producir estos materiales con modificaciones mínimas en sus contenidos de elementos aleantes y obtener las mismas propiedades mecánicas.

Bajo esta filosofía y de los resultados obtenidos, los aceros fabricados experimentalmente lograron obtener propiedades mecánicas muy cercanas a las de un acero titular o 38MnVS de fabricación comercial. Se debe destacar que los cigüeñales fabricados con los aceros 38MnV11+Ti se forjaron directamente de colada, es decir, no se roilaron en caliente, esto significa una optimización del proceso debido a que se eliminaría un proceso de fabricación en la materia prima y por lo tanto de reduce el costo de la palanquilla de acero 38MnVS para la forja de cigüeñales y además representa una potencial opción para fabricar piezas automotrices con aceros colados y con aceptables propiedades mecánicas con énfasis en la tenacidad.

Referente a lo anterior, de los ensayos de tensión, el acero experimental 38MnV11+Ti obtuvo 40 MPa (880MPa) menos que los valores obtenidos con un acero titular (920 MPa), sin embargo los valores del acero 38MnV11+Ti fueron más consistentes que los producidos por el acero titular, pues los valores de elongación del acero experimental tienen una desviación estándar de 0.9 y la del acero titular fue de 3.35. Este mismo comportamiento se observó con los resultados del ensayo charpy y además, el acero experimental obtuvo un valor promedio de 17 Joule y el acero de titular de 11.3, lo cual significa una mejora de 5.7 Joule.

Sin embargo, ambos aceros presentaron algunos resultados dispares los cuales tienen su explicación en el tipo de inclusiones encontradas en cada material. El acero titular contiene principalmente inclusiones del tipo MnS, de formas irregulares y distribuidas en la ferrita y algunas en la perlita las cuales favorecen la propagación de grietas por los límites de grano reduciendo las propiedades mecánicas. Por otro lado los aceros experimentales presentan inclusiones del tipo MnS y otras de formación compleja del tipo $O_2Al_2MnS+Ca$. Se observaron algunas inclusiones redondas conformadas por MnS+Ca lo cual evidencia la acción de la adición de calcio en la modificación de este tipo de inclusiones, no obstante, en las inclusiones combinadas de O_2Al_2MnS el efecto modificar de forma del calcio fue mínimo o nulo, teniendo como consecuencia que se facilitara la fractura en este tipo de inclusiones.

De la literatura revisada, se reportan datos de fractura en este tipo de materiales donde señalan que la propagación de la falla es por los límites de grano, pero omiten puntualizar que las inclusiones generan o facilitan la propagación de la falla. De los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se encontró que las grietas son favorecidas por la presencia de las inclusiones MnS de forma irregular y por las inclusiones complejas tipo O_2Al_2MnS , como se muestra en las siguientes fotomicrografías.

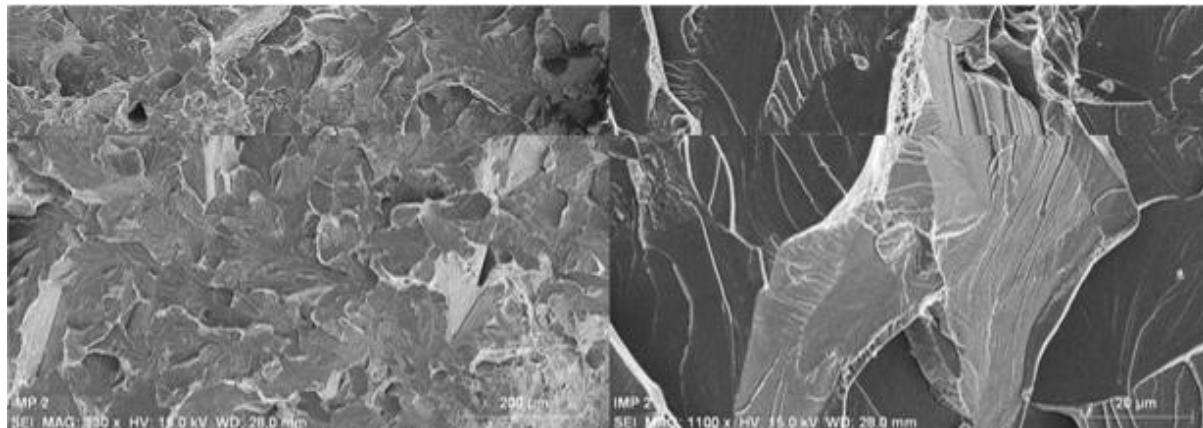


Figura 94 Vista general de la fractura del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca

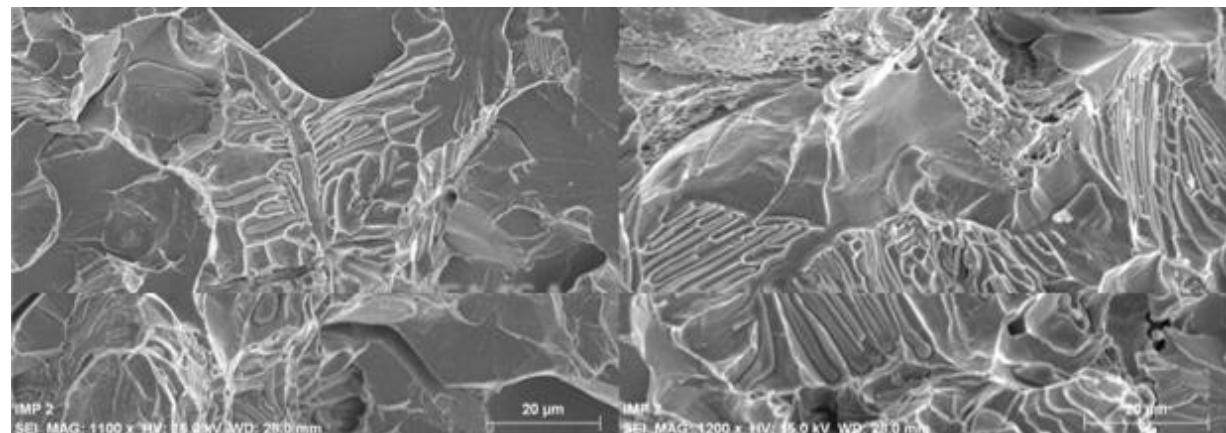


Figura 95 Presencia en grano de ferrita de inclusiones tipo MnS de forma alargada del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca.

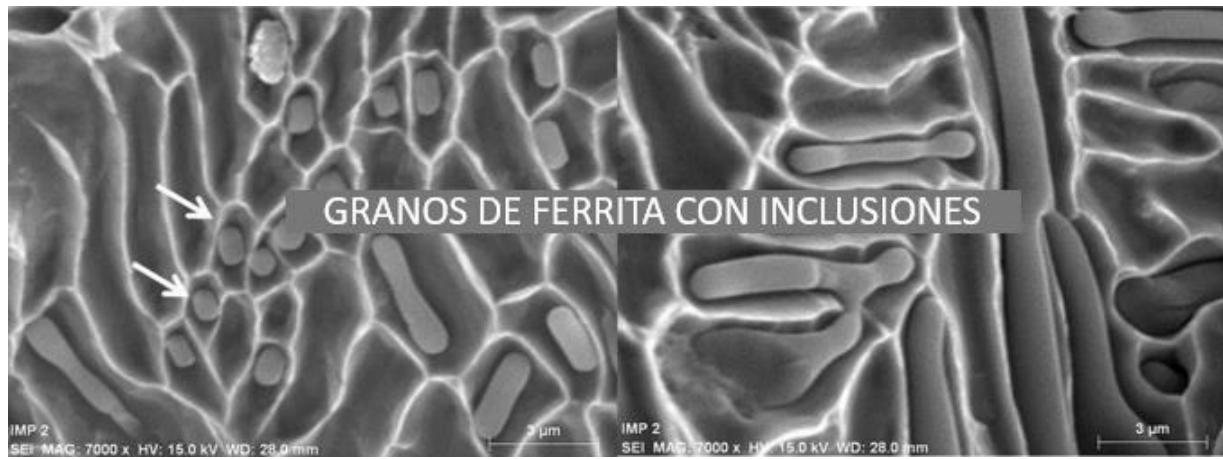


Figura 96 Presencia en grano de ferrita de inclusiones tipo MnS de forma globular (señaladas) y alargada del ensayo de tensión de aceros forjados 38MnV11S+Ca.

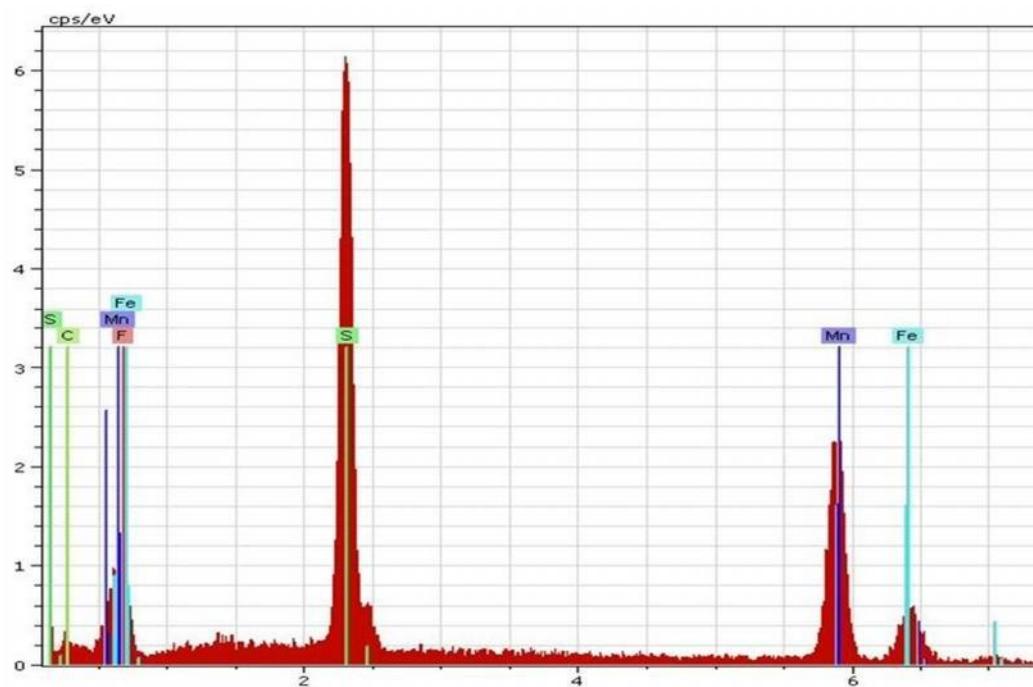


Figura 97 EDS de las inclusiones encontradas en fractografía del ensayo de tensión de los aceros forjados 38MnV11S+Ca



Figura 98 Inclusión compleja formada por O₂, Si, Al, Ca, Mn y S - acero forjado 38MnV11S+Ca.

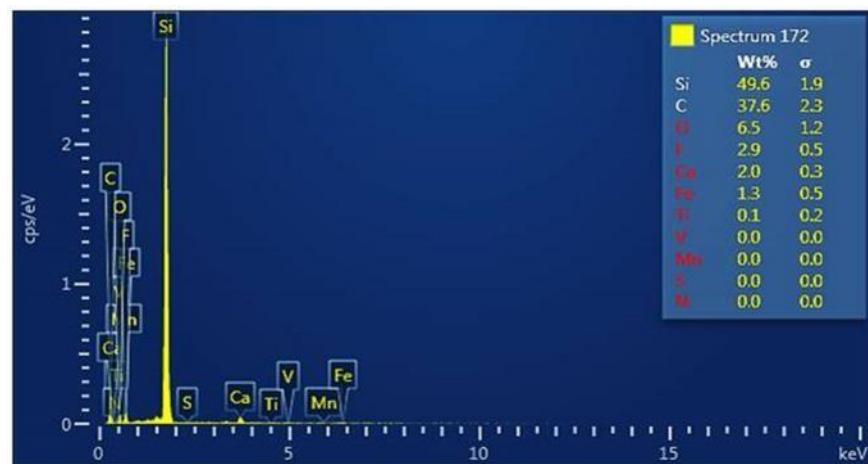


Figura 99 . EDS de la inclusión compleja formada por O₂, Si, Al, Ca, Mn y S - acero forjado 38MnV11S+Ca

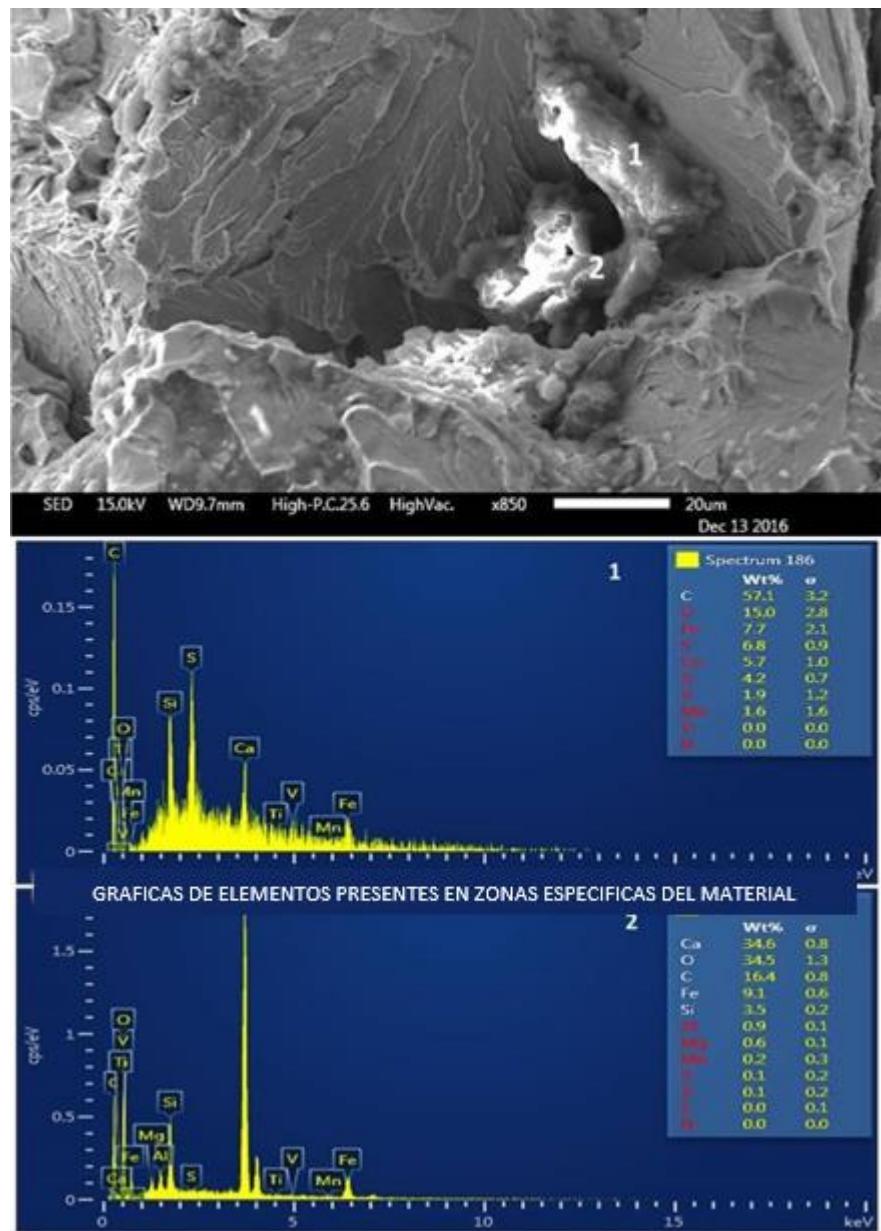


Figura 100 Inclusión compleja formada por O₂, Si, Al, Ca, Mn y S – acero forjado 38MnV11S+Ti

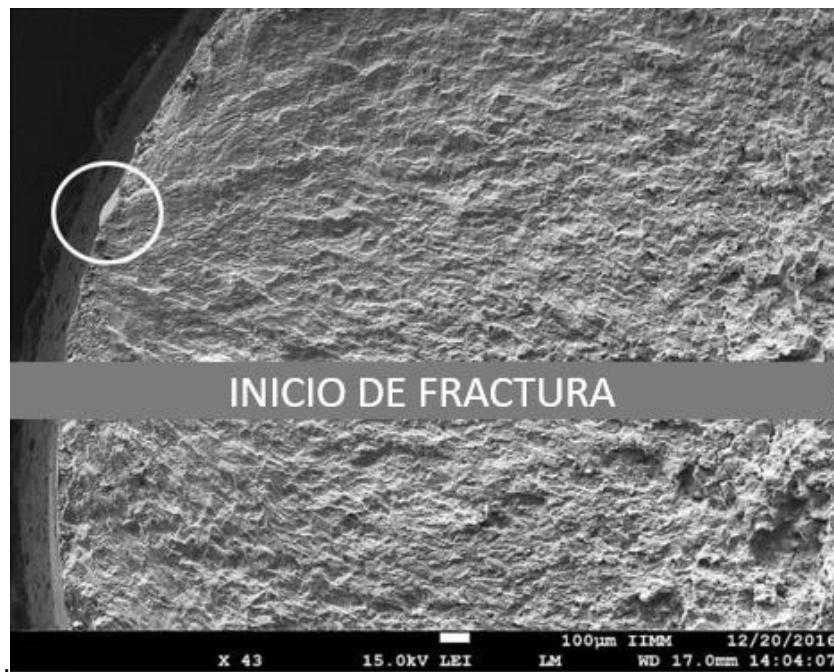


Figura 101 Inicio de la fractura en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti



Figura 102 Fractura intra-granular en la probeta del ensayo de fatiga – acero forjado 38MnV11S+Ti

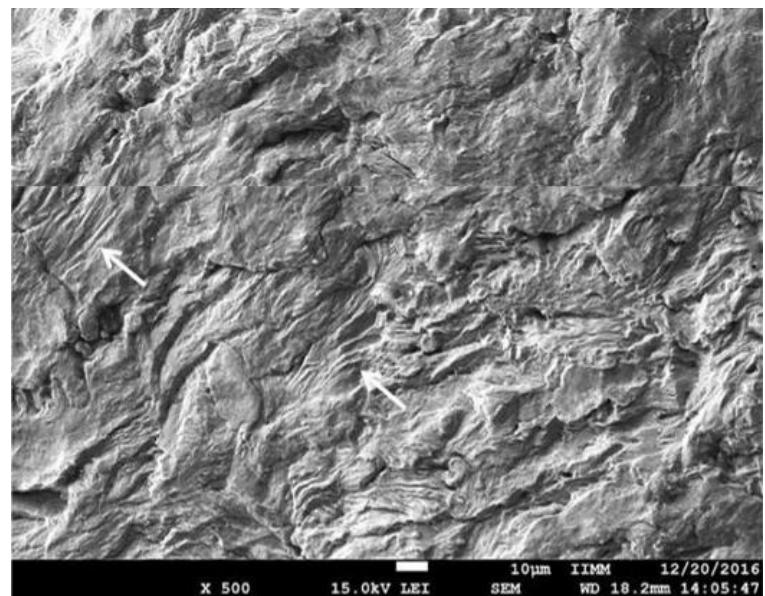


Figura 103 Sentido de la propagación de la fractura en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti

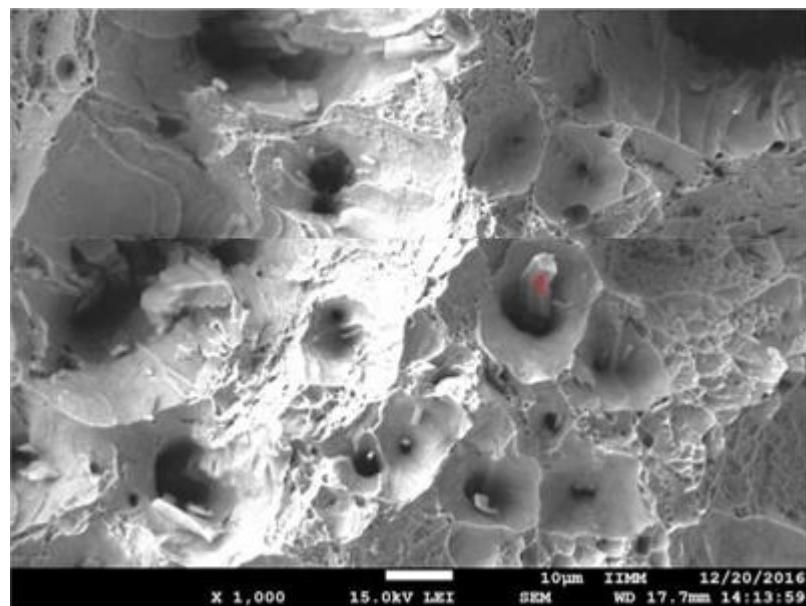


Figura 104 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti

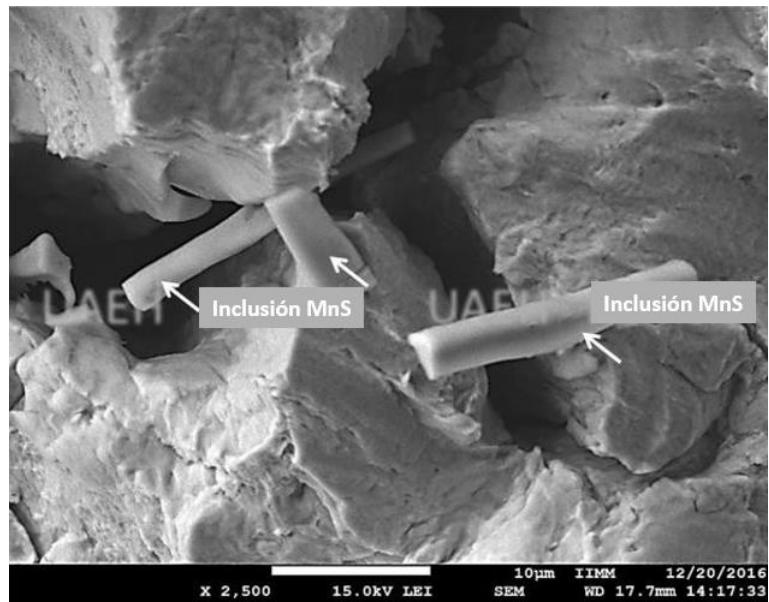


Figura 105 . Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti

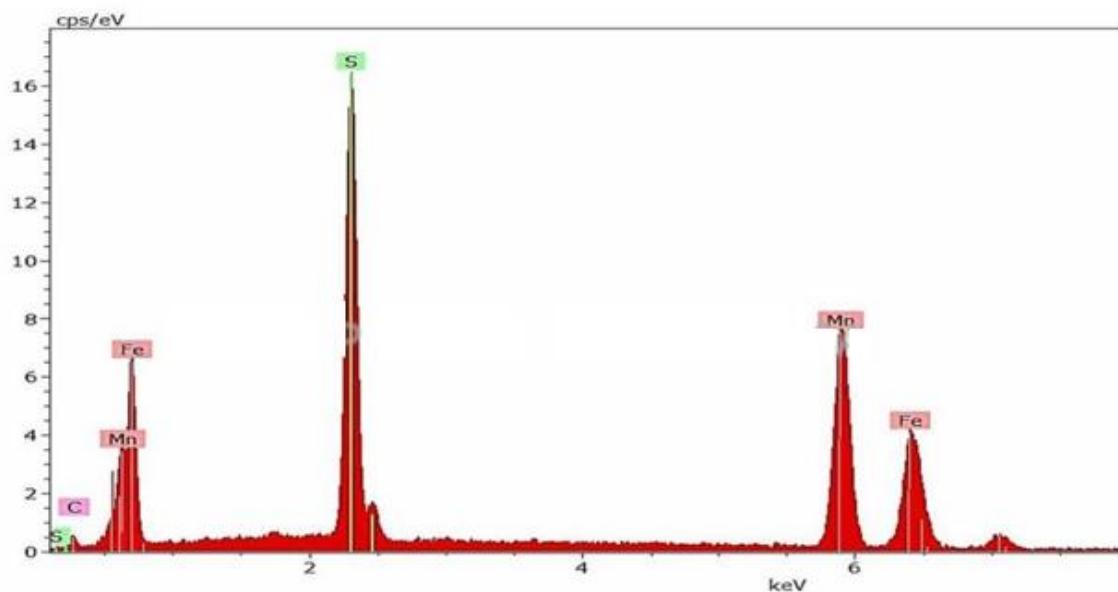


Figura 106 EDS de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo de fatiga - acero forjado 38MnV11S+Ti

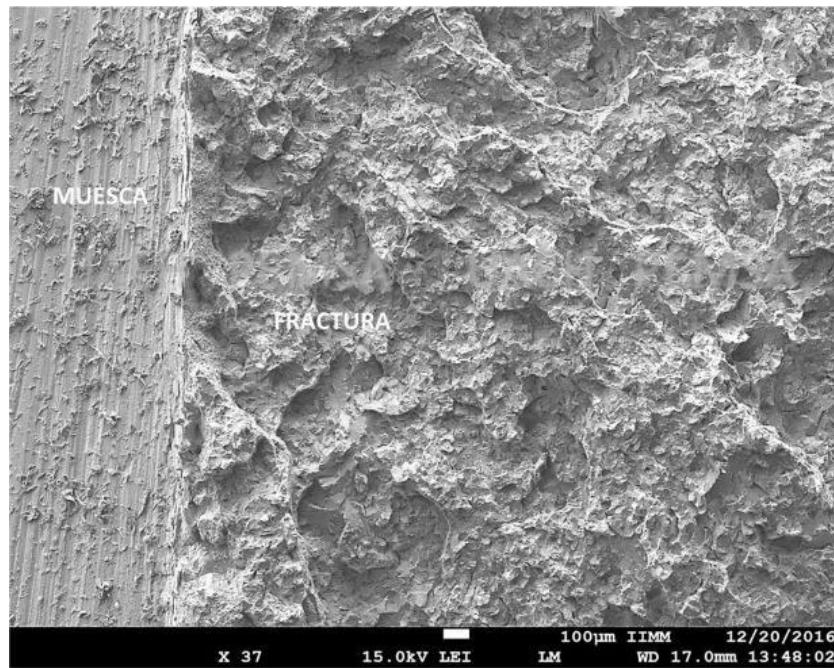


Figura 107 Fractura de la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti

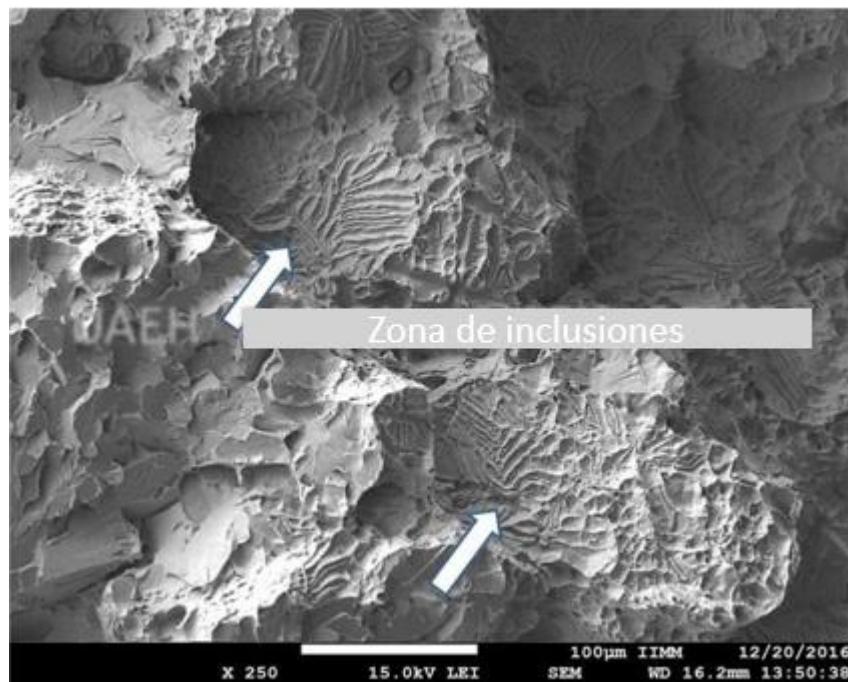


Figura 108 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo Charpy

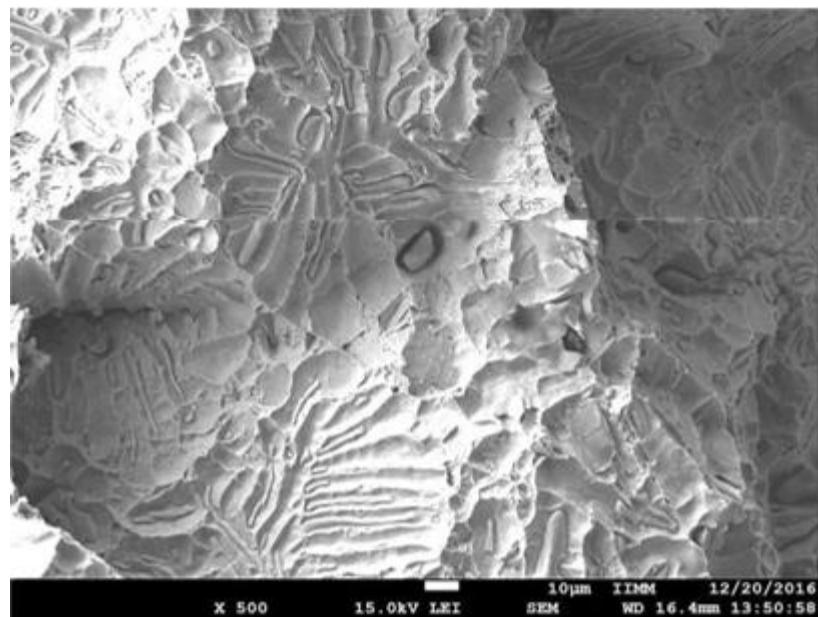


Figura 109 Presencia de inclusiones tipo MnS en la probeta del ensayo Charpy acero forjado 38MnV11S+Ti

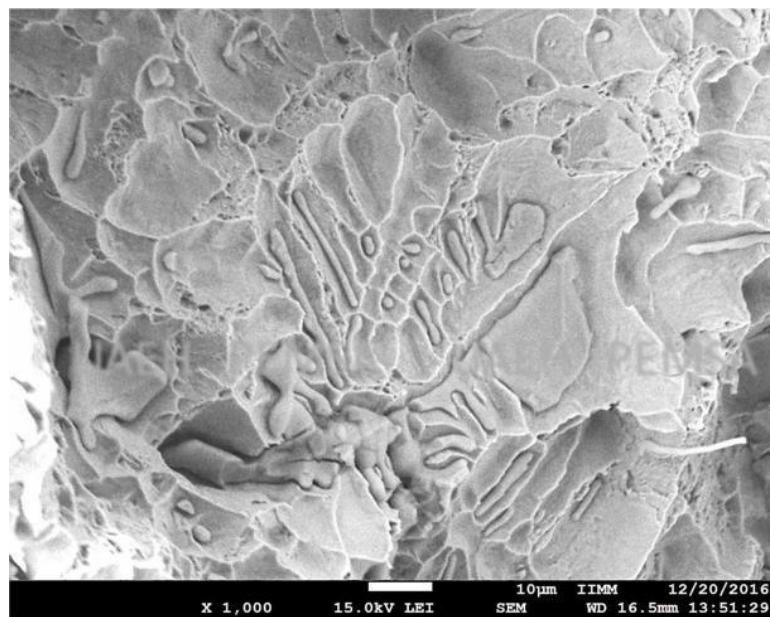


Figura 110 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti

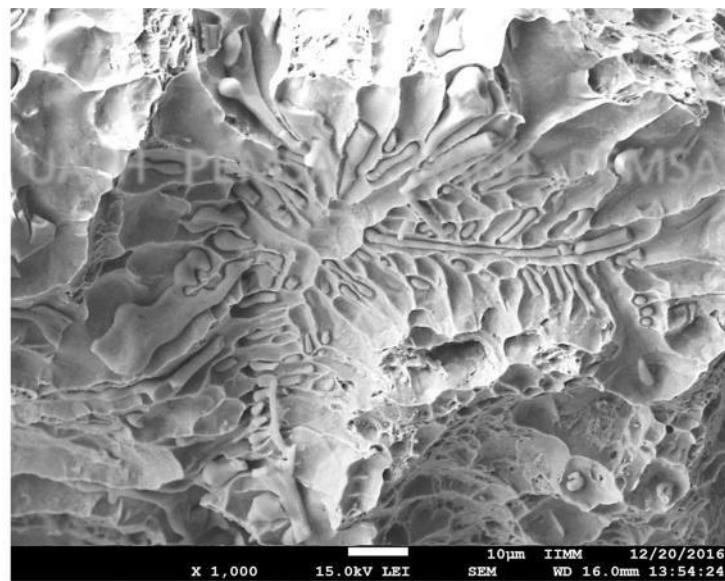


Figura 111 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti

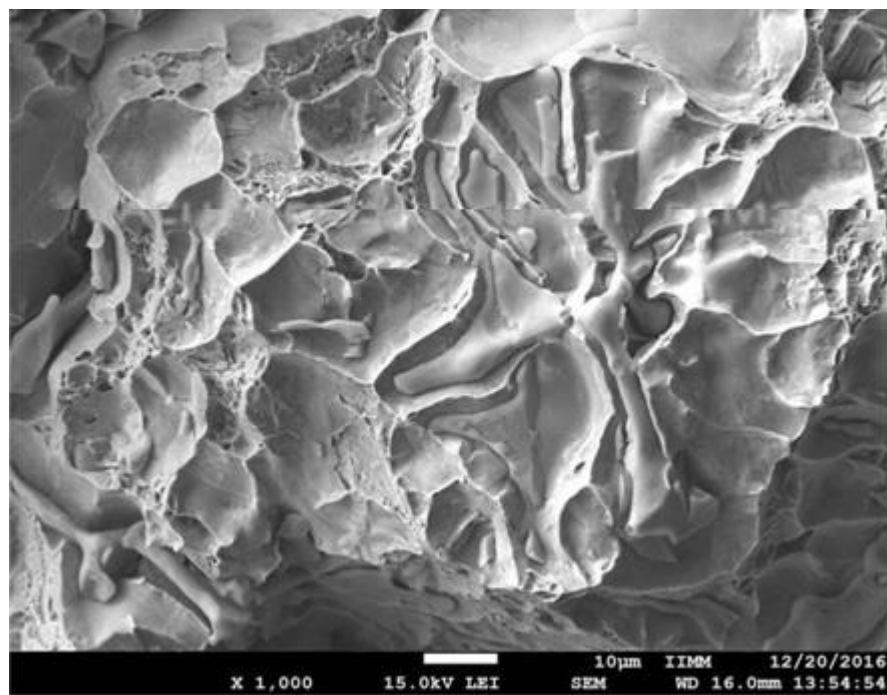


Figura 112 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti

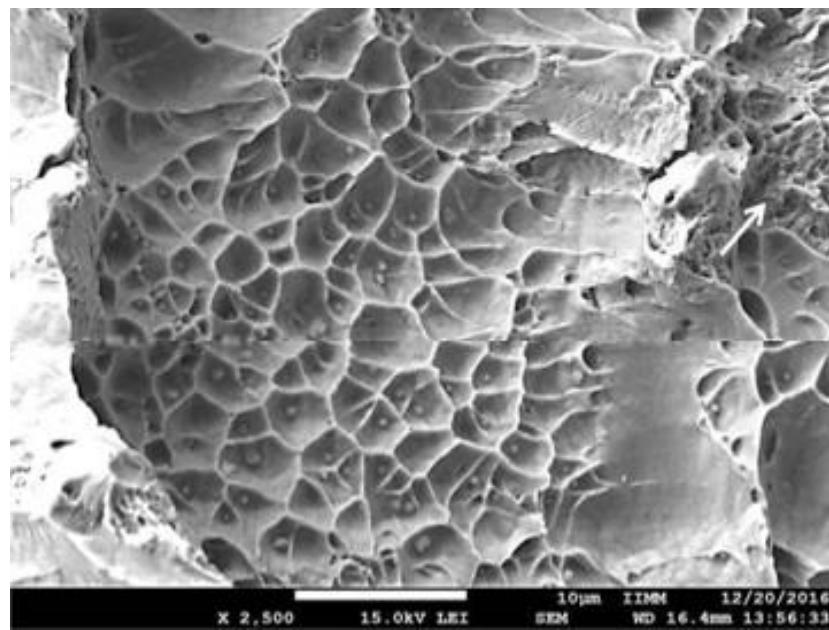


Figura 113 Presencia de inclusiones tipo MnS+Ca de forma globular en la probeta del ensayo Charpy - acero forjado 38MnV11S+Ti

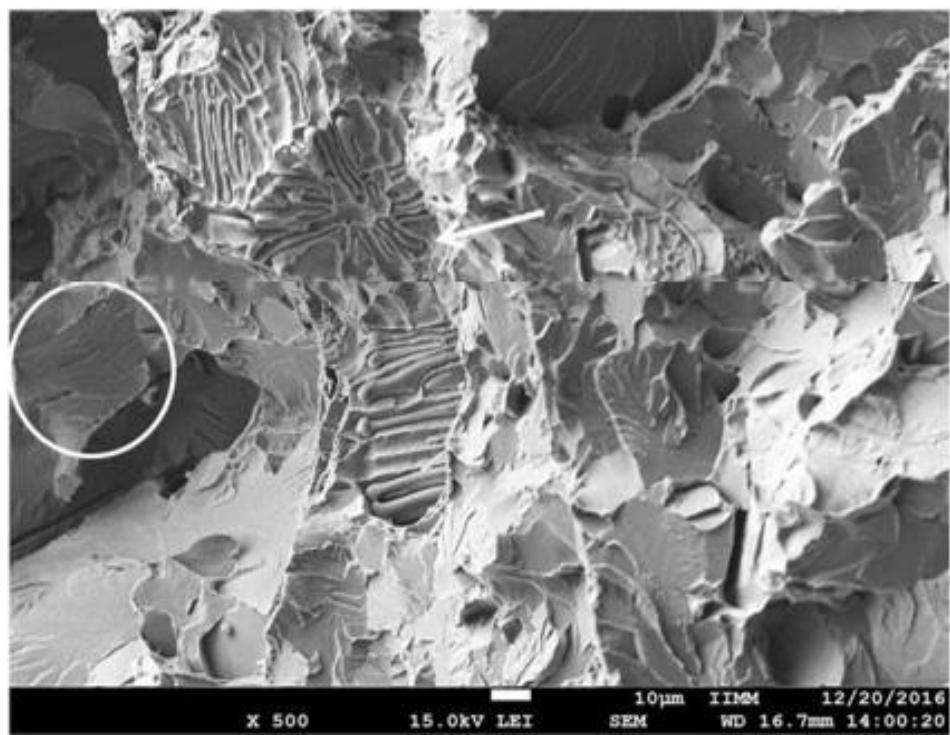


Figura 114 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular y fractura por clivaje en un grano de ferrita - acero forjado 38MnV11S+Ti

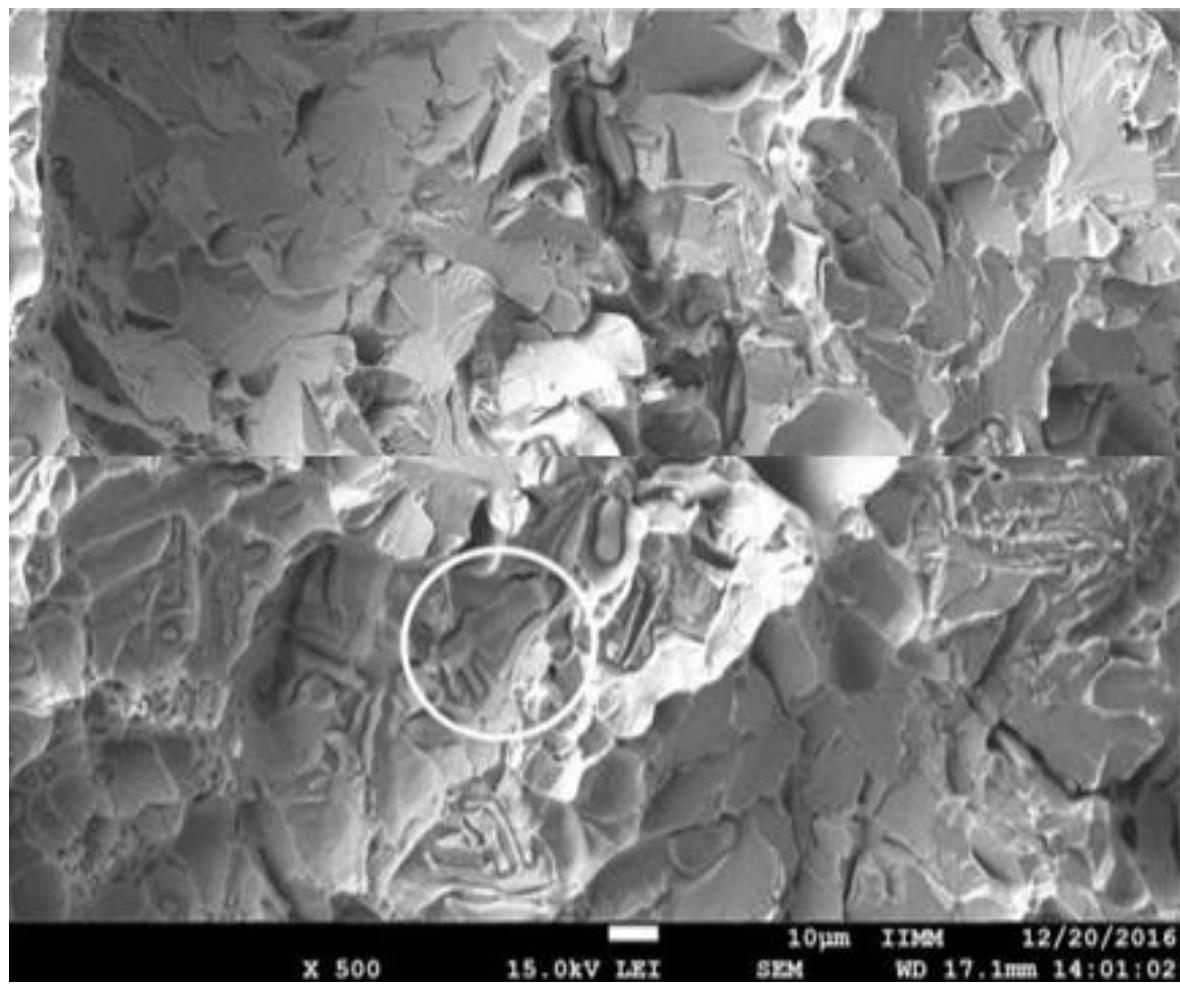


Figura 115 Presencia de inclusiones tipo MnS de forma irregular y fractura por clivaje en un

CAPITULO V CONCLUSIONES

- 1.- Se logró establecer la composición química final para fabricar por fundición lingotes de acero tipo **38MnV11S+Ti** en base a las materias primas disponibles.
- 2.- Se tiene documentado el proceso de fundición para producir los aceros **38MnV11S+Ti**.
- 3.- En el proceso de fundición, se redujo el rechuve y la contracción de los lingotes logrando maquinar lingotes sanos para ser forjados.
- 4.- Se determinó la temperatura de forjado que permite obtener una combinación optima de ferrita + perlita.
- 5.- Los resultados de tensión, fatiga y charpy están dentro de lo establecido por las normas internacionales para aceros de composición química similar.
- 6.- La adición de calcio permitió modificar la forma de las inclusiones tipo MnS logrando una mejora en la tenacidad del material (ensayo Charpy).
- 7.- La fractura de los aceros 38MnV11S+Ca es favorecida por la presencia de inclusiones complejas tipo $O_2Al_2MnS+Ca$.

REFERENCIAS

Referencias Bibliográficas

- [1] Vicencio Miranda Arturo "La incidencia de la calidad y la productividad en la competitividad de las organizaciones: El caso de dos empresas automotrices en México" ciencias administrativas de en la escuela superior de comercio y administración del instituto politécnico Nacional. No. 221 enero-abril 2007. Pag 213-226
- [2]Covarrubias Valdenebro Alex, marzo 2014 "Explosión de la industria automotriz en México: De sus encadenamientos actuales a su potencial transformador"
- [3] (Barrera Franco Adriana, 2016)
- [4] Secretaria de Economia, Industria automotriz, Monografía dirección general de industria pesadas y de alta tecnología. Marzo 2012
- [5] 15 Junio 2011(<http://www.alianzaautomotriz.com/noticias/nuevos-materiales-en-la-fabricacion-de-carrocerias-modernas/>)
- [6] Juan pedro Jassó Bas,Materiales utilizados en la fabricación de carroceriasde vehículos. Publicaciones didácticas No. 20 Dicembre 2011
- [7] García Lázaro Diego, Tipos de aceros en las Carrocerías y su Reparabilidad, no. 41 Julio- Septiembre 2009 www.centro-zaragoza.com. Safety Cage-steel grades, 41, 2009.
- [8] Nuevos materiales en la fabricación de carrocerías modernas 15 Junio 2011 <http://www.alianzaautomotriz.com/noticias/nuevos-materiales-en-la-fabricacion-de-carrocerias-modernas/>
- [9] Entrevista a Sam Froes
"La industria automovilística y la aeroespacial están interesadas en usar más titanio"
<http://www.agenciasinc.es/Entrevistas/La-industria-automovilistica-y-la-aeroespacial-estan-interesadas-en-usar-mas-titanio>
UC3M | 06 junio 2008 12:05
- [10] los aceros AHSS. Su fabricación y uso octubre 2014
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AcerosAHSS.Fabricacion.Uso.pdf>

- [11] Barajas Aguilar Norma Cecilia, García Lara Moisés Adrián, Camporredondo Saucedo José Emilio, tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz, octubre- diciembre 2016.
- [12] Rojas Javier, Desarrolla SMDI acero AHSS de tercera generación para industria automotriz 2 de agosto de 2016. (http://www.reportacero.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9156:desarrolla-smdi-acero-ahss-de-tercera-generacion-para-industria-automotriz&catid=48:nacioanles)
- [13] Hormaetxe de Lucas Asier, Diseño de la transmisión de un automovil 08 julio 2015
- [14] Larusso Hernán, Burgueñoo Alejandro, Svoboda G. Hernán “Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros Dual-Phase” CONAMET/SAM-2008
- [15] Annual book of ASTM standards, “Standard Test Method for Tensile Testing of Metallic Materials”ASTM, Vol. 03.01,2009 pp.542-566.
- [16] Annual book of ASTM standards.”Test method”
- [17] asm hanbook charaecteriztic and metalurgia pp.600
- [18] <https://www.vocabulary.com/dictionary/steel>
- [19] <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/steel>
- [20] <http://www.eumed.net/libros-gratis/ciencia/2013/14/acero-propiedades.html>
- [21] <https://www.cea-online.es/blog/128-seguridad-activa-y-pasiva-del-vehiculo>
- [22] Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica (Mecapedia) Universitat Jaume I (24/06/2014)
- [23] Tutorial nº 218 Ensayos de Dureza en los Materiales www.ingemecanica.com
- [24] Laboratorio Metalinspec, Para que son útiles las pruebas de impacto, noviembre 27 de 2018 <http://blog.metalinspec.com.mx/post/para-que-son-utiles-las-pruebas-de-impacto>

Referencias imágenes

- [1] Tipos de vehículos en Mexico, Secretaria de Economía, marzo 2012
- [2] Diego García Lázaro. Julio-septiembre 2009.
- [3] Los aceros AHSS. Su fabricación y uso octubre 2014
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AcerosAHSS.Fabricacion.Uso.pdf>
- [4] Diagrama global de formabilidad de los aceros AHSS, Keeler y Kimchi, 2014.
- [5] (Galan et al; 2012.) tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz, octubre- diciembre 2016.
- [6] Hormaetxe de Lucas Asier, Diseño de la transmisión de un automóvil 08 julio 2015
- [10]“BaoSteel automotive advanced high strength steels”, en
http://tv.baosteel.com/web/plc/p-pdf/automotive_advanced_high_strength_steele_en.pdf, visitado en diciembre de 2013.
- [11](PDF) Aceros planos avanzados de alta resistencia. Available from:
https://www.researchgate.net/publication/261525083_Aceros_planos_avanzados_de_alta_resistencia [accessed Dec 20 2018].
- [12] Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica (Mecapedia) Universitat Jaume I (24/06/2014)

Referencia de tablas

- [1] Diego García Lázaro. Julio-septiembre 2009. García Lázaro Diego, carrocería y pintura: Tipos de aceros en las Carrocerías y su Reparabilidad, no. 41 Julio- Septiembre 2009
www.centro-zaragoza.com
- [2] Mtro. Felipe Díaz del Castillo R. “Los nuevos aceros para la industria Automotriz” Cuautitlán Izcalli 2009
- [3] Barajas Aguilar Norma Cecilia, García Lara Moisés Adrián, Camporredondo Saucedo José Emilio, tendencia de los aceros y su aplicación en la industria automotriz, octubre- diciembre 2016. **Elaboración propia con datos de World Auto Steel, 2016.**
- [4] http://www.thyssen-iberica.es/htm/tabla_construccion.htm#acarbono
- [5] <https://es.slideshare.net/GuillemoGarcia/aceros-47439650>