



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO
ESCUELA SUPERIOR DE CD. SAHAGÚN**



T E S I S

**FUNDICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN ACERO DE
MEDIO CARBONO MICROALEADO CON VANADIO
PARA LA FORJA DE CIGÜEÑALES**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA
EDUARDO OTERO TINAJERO**

**ASESOR:
DR. JORGE ZUNO SILVA**

**COASESOR:
DR. FRANCISCO VAPEANI GUERRA LÓPEZ**

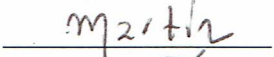






DICIEMBRE, 2016



**P. D. L. I. M. C. EDUARDO OTERO TINAJERO
PRESENTE**

Por este conducto le comunico que el Jurado que le fue asignado a su trabajo de titulación denominado "FUNDICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN ACERO DE MEDIO CARBONO MICROALEADO CON VANADIO PARA LA FORJA DE CIGÜEÑALES" y que después de revisarlo en reunión de sinodales han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

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

PRESIDENTE:	DR. MARTÍN ORTÍZ DOMÍNGUEZ	
PRIMER VOCAL:	DR. JORGE ZUNO SILVA	
SEGUNDO VOCAL:	M. EN C. ARTURO CRUZ AVILÉS	
TERCER VOCAL:	M. EN C. YIRA MUÑOZ SÁNCHEZ	
SECRETARIO:	DR. MIGUEL ÁNGEL FLORES RENTERÍA	
PRIMER SUPLENTE:	DR. FRANCISCO VAPEANI GUERRA LÓPEZ	
SEGUNDO SUPLENTE:	DR. JUSTO FABIAN MONTIEL HERNÁNDEZ	

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

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
Cd. Sahagún, Hgo., a 15 de diciembre de 2016.



M. EN C. YIRA MUÑOZ SÁNCHEZ
Coordinadora de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado a todas las personas que me brindaron su apoyo y su aportación de diferentes maneras en la realización de este proyecto.

Mis padres y hermana. Sr. Emilio Otero Cruz, Sra. Margarita Tinajero Barrera e Ing. Marina Otero Tinajero, por su apoyo incondicional y motivación durante mi formación profesional y humana.

Mis compañeros y amigos de la Licenciatura por su amistad y compañerismo en especial a Ismael García Harris por su apoyo y aporte durante la realización de este proyecto.

Mi asesor y coasesor. Dr. Jorge Zuno Silva y Dr. Francisco Vapeani Guerra López, por sus consejos, guía, exigencia y su confianza durante mi formación profesional.

PEMSA. Por permitirme participar en el proyecto, por su apoyo, colaboración y enseñanzas, en especial a M.C. Ismael Ruiz López e Ing. Oswaldo Palomino Torres.

A UAEH y todos los profesores durante la licenciatura, por ser mí casa de estudios y darme la mejor formación profesional.

RESUMEN

Ante la instalación de importantes empresas automotrices en México, surge la creciente demanda de fabricar cigüeñales forjados para motores de alta desempeño mecánico lo que impulsa a generar el conocimiento básico y tecnológico para producir aceros con características superiores a los comerciales. En este sentido, se desarrolló un proceso de fundición para determinar la composición química óptima que nos mejore las propiedades mecánicas de estos aceros de medio carbono.

Se realizaron adiciones sistemáticas de vanadio para aumentar la resistencia a la tensión y tierras raras para modificar la forma de las inclusiones no metálicas tipo MnS y acrecentar la tenacidad. Se obtuvieron lingotes redondos de 390 mm de largo con 89.1 de diámetro para ser forjados.

De la nariz del cigüeñal forjado, se fabricaron probetas de tensión, dureza y metalográficas para su caracterización y su posterior correlación para determinar las variables óptimas de fundición y forja. De los resultados obtenidos se concluye que: las propiedades mecánicas de dureza, límite de cedencia, resistencia máxima y la fase de la microestructura Ferrita-Perlita de los cigüeñales fabricados con el acero experimental (vanadio 0.11% + TR), se asemejan con los resultados obtenidos de los cigüeñales utilizados en motores de alto rendimiento (Modelo1_M1, Modelo1_M2, Modelo2_M1 y Modelo2_M2). El número de tamaño de grano disminuye con la adición de vanadio (0.11%) + TR, por lo tanto se tiene un incremento en el contenido de los granos. La adición de 0.11% de vanadio + Tierras raras incrementa la resistencia máxima del material, lo cual concuerda con los valores de dureza antes mostrados, sin embargo este endurecimiento produce una disminución en el porcentaje de elongación, este endurecimiento es atribuido al incremento en volumen de perlita en el material. La adición de 0.11% de Vanadio + Tierras raras redujo un 40-50% la descarbonación del material producida por el calentamiento previo a la forja.

Palabras claves. Fundición, acero de medio carbono, microaleado, vanadio, Tierras raras, forja en caliente, cigüeñales.

ABSTRACT

With the arrived of important automotive companies in Mexico, there is a growing demand for the manufacture of forged crankshafts for engines with high mechanical performance, which promotes the generation of basic and technological knowledge to produce steels with superior characteristics to commercial ones. In this sense, a casting process was developed to determine the optimum chemical composition that would improve the mechanical properties of these medium carbon steels.

Systematic vanadium additions were made to increase tensile strength and rare earths to modify the shape of non-metallic MnS inclusions and increase toughness. Round ingots of 390 mm long with 89.1 in diameter were obtained for forging. From the nose and the main bearing journal of the forged crankshaft, tensile, hardness and metallographic specimens were obtained for their characterization and subsequent correlation to determine the optimal casting and forging variables.

From the results obtained, it was conclude that the mechanical properties of hardness, yield strength, maximum strength and the phase of the Ferrite-Perlite microstructure of the crankshafts manufactured with the experimental steel (vanadium 0.11% + TR), are similar to the results obtained from crankshafts used in high performance engines (Model1_M1, Model1_M2, Model2_M1 and Model2_M2). The number of grain size decreases with the addition of vanadium (0.11%) + TR, therefore there is an increase grain size volume fraction. The addition of 0.11% vanadium + rare earths increases the maximum strength of the material, which agrees with the hardness values shown above, however this hardening produces a decrease in the percentage of elongation, this hardening is attributed to the increase in volume of Perlite in the material. The addition of 0.11% Vanadium + rare earths reduced the decarburization of the material produced by pre-forging heating by 40-50%.

Keywords. Foundry process, medium carbon Steel, microalloyed, vanadium, rare earths, forge, crankshaft

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	I
PROBLEMÁTICA	II
MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	II
SOLUCIÓN PROPUESTA	III
OBJETIVO	III
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	IV
METODOLOGÍA	IV

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Aceros aplicados en forja.....	1
1.1.1 Clasificación de aceros para forja.....	1
1.1.2 Aceros al carbón y de baja aleación.....	1
1.1.3 Tratamientos térmicos para aceros al carbón y de baja aleación	2
1.1.4 Aceros microaleados.....	4
1.2 Características de un cigüeñal.....	5
1.2.1 Tren motriz, (Crank train).....	5
1.2.2 Cigüeñal y partes complementarias.	6
1.2.3 Partes del cigüeñal.	7
1.2.4 Esfuerzos a los que está sometido un cigüeñal.	7

CAPÍTULO 2. CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL PROCESO DE FORJA

2.1 El proceso de forja.	10
2.2 Clasificación de las operaciones de forja.....	10
2.2.1 Forja libre	11
2.2.2 Forja con estampas.....	11
2.3 Etapas del proceso de forja.	12
2.4 Características de los productos forjados.....	13
2.5 Consideraciones en el diseño de productos forjados	14
2.6 Máquinas para el proceso de forja de un Cigüeñal	14

2.7 Características relevantes de calidad en productos forjados.....	16
--	----

CAPÍTULO 3. CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

3.1 Introducción	18
3.2 Clasificación de fundición	19
3.3 Procesos de fundición.	24
3.4 Etapas del proceso de fundición.	25
3.5 Diseño del producto	26
3.6 Tipos de moldes	27
3.7 Efecto de los elementos aleantes en el acero (%C, Mn, Si, V, Ca, Cr, Mo, Cu).	31
3.8 Efecto de los elementos nocivos (P, S, N, O, H).	33
3.9 Aceros microaleados para forja.	34

CAPÍTULO 4 .DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Fabricación de material.....	37
4.1.1 Construcción del molde cilíndrico y cuchara.....	38
4.1.2 Preparación del material y Colada.	41
4.1.3 Solidificación.	44
4.1.4 Des-moldeo.	45
4.2. Procesamiento del material.	45
4.2.1 Maquinado de lingotes.	45
4.2.2 Forja de cigüeñales.....	46
4.2.3 Obtención de probetas.....	46
4.3. Ensayos mecánicos y caracterización metalográfica.	47
4.3.1 Ensayo de tensión.....	47
4.3.2 Dureza.	48
4.3.3 Análisis metalográfico.	50

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Fundición.....	52
5.1.1 Defectos de fundición.....	59
5.2 Forja del cigüeñal.....	61
5.3 Caracterización metalográfica y Ensayos mecánicos.....	63
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICE A.....	78
APÉNDICE B.....	108
APÉNDICE C.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Esquema del tren motriz. (Castro Vicente, Miguel de 1985).	5
1.2. Cigüeñal y partes complementarias de un motor.....	6
1.3. Partes del cigüeñal.	7
1.4. Imagen esquemática del esfuerzo de torsión en un cigüeñal.	8
1.5. Deformación debida a la flexión.....	8
1.6. Esquema de mecanismo biela- manivela.	9
2.1. Acero forjado a alta temperatura.	10
2.2. Forja libre de un eje y disco.....	11
2.3. Imagen ilustrativa de una estampa y piezas producidas con este medio.	11
2.4. Esquema de una prensa utilizada en el proceso de forja.....	14
2.5. Esquema de las partes que componen un martillo para forja.	16
2.6. Estructura típica de solidificación de un lingote.....	17
3.1. Primeras fundiciones en el 4000 a.C.	19
3.2. Clasificación de las láminas de grafito.	19
3.3. Microestructura de la fundición blanca.	20
3.4. Microestructura del hierro Nodular.	21
3.5. Diagrama hierro-carburo de hierro [5, 6].....	23
3.6. Pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.	27
3.7. Fundición en molde permanente por gravedad.....	29
3.8. Molde permanente a baja presión.	30
3.9. Fundición en molde permanente a alta presión.	30
3.10. Comparativa sobre el proceso de enfriamiento después de la forja en caliente entre aceros convencionales y aceros microaleados.	35
4.1. Horno de inducción con capacidad de 30 kg, utilizado para la fusión de las aleaciones de hierro.	37
4.2. Diseño de la lingotera metálica.....	39
4.3. Cucharilla metálica.	39
4.4. Colcha cerámica refractaria colocada en la parte superior de las lingoteras.	40

4.5. Estructura del molde cilíndrico con bisagras.....	40
4.6. Palanquilla de acero utilizada para la fusión de acero de medio carbono microaleado con vanadio.	41
4.7. Corte de palanquilla tipo chatarra.	43
4.8. Limpieza de Sorel (arrabio) con cepillo de alambre.....	44
4.9. Solidificación del metal en lingotera metálica.....	44
4.10. Imagen esquemática del seccionamiento para obtención de probetas.....	46
4.11. Máquina universal para ensayos mecánicos.	47
4.12. Geometría de las probetas para el ensayo de tensión.....	48
4.13. Indentaciones en el plato	49
4.14. Indentaciones en el Núcleo.	49
4.15. Esquema de cortes de cigüeñal.	49
4.16. Microscopio óptico metalúrgico.	50
4.17. a) Zonas para la obtención de la prueba de tamaño de grano, b) Zona para la prueba de descarburación y c) Zona para la cuantificación de fases.	51
5.1. Palanquilla dentro del crisol	53
5.2. Adición de escoriador.	53
5.3. Adición de los elementos aleantes.	54
5.4. Tierras raras encapsuladas	54
5.5. Reacción de las tierras raras.....	54
5.6. Vaciado del metal en lingoteras.....	55
5.7. Lingotera metálica con colcha refractaria justo después del vaciado.....	55
5.8. Enfriamiento de los lingotes	56
5.9. Material para análisis químico.....	56
5.10. Lingote solidificado donde se observa el gradiente de temperatura debido a la presencia de la colcha cerámica en la parte superior	57
5.11. Lingote solidificado	58
5.12. Lingotes colados que se utilizaran para obtener probetas para los diferentes ensayos mecánicos y metalográficos	59
5.13. Lingotes colados que se utilizaran para obtener probetas para los diferentes ensayos mecánicos y metalográficos	59

5.14. Imágenes comparativas de 2 lingotes cortados a la misma distancia donde se observa la diferencia en profundidad del rechupe.	60
5.15. Macroporosidad debido a contaminación y humedad	60
5.16 a. Cigüeñales forjados con el acero experimental.....	62
5.16 b. Cigüeñales forjados en la empresa PEMSA con el acero experimental	62
5.17. Metalografía y tamaño de grano por método comparativo ASTM a 6mm de la superficie, a) Modelo 1 muestra1 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+Tierras Raras muestra 1, y f) V 0.11+TR muestra 2. ...	63
5.18. Micrografías de la superficie decarburada, a) Modelo 1 muestra1 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+ TR 1, y f) V 0.11+Tierras Raras 2.....	65
5.19. Micrografías utilizadas para la cuantificación de fases a 6 mm de superficie, a) Modelo 1 muestra1 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+ TR 1, y f) V 0.11+TR 2	66
5.20. Dureza del plato de los diferentes materiales y muestras	68
5.21. Dureza del núcleo de los diferentes materiales y muestras	70
5.22. Curva esfuerzo deformación de los diversos materiales y muestras	71

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Forjabilidad de aceros y aleaciones	2
1.2. Aceros al carbón y de baja aleación para forja	3
4.1. Composición química	42
5.1. Composición 0% V.....	52
5.2. Composición 0.05% V.....	52
5.3. Composición 0.09% V.....	52
5.4. Composición 0.11% V.....	52
5.5. Composición 0.09% V Con TR.....	52
5.6. Composición 0.11% V Con TR.....	52
5.7. Composición 0.11% V con TR 1	61
5.8. Composición 0.11% V Con TR 2	61
5.9. Tabla comparativa del tamaño de grano	63
5.10. Resultado de Descarburación.....	64
5.11. Resultados de la cuantificación de fases.....	66
5.12. Dureza de plato Modelo1_M1.....	67
5.13. Dureza de plato Modelo1_M2.....	67
5.14. Dureza de plato Modelo2_M1.....	67
5.15. Dureza de plato Modelo2_M2	67
5.16. Dureza de plato TR_M1.....	68
5.17. Dureza de plato TR_M2.....	68
5.18. Dureza de núcleo Modelo1_M1.....	69
5.19. Dureza de núcleo Modelo1_M2.....	69
5.20. Dureza de núcleo Modelo2_M1.....	69

5.21. Dureza de núcleo Modelo2_M2.	69
5.22. Dureza de núcleo TR_M1.....	70
5.23. Dureza de núcleo TR_M2.....	70
5.24. Resultados de los ensayos de tensión.	71

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las principales directrices en el diseño y fabricación de automóviles son el ahorro de combustible y la disminución de gases contaminantes. Bajo estas premisas, en las últimas dos décadas, los motores de combustión interna han evolucionado exponencialmente en su conceptualización (motores más pequeños) y desempeño mecánico (potencia más alta) con mayor eficiencia en la combustión, logrando una considerable reducción en la emisión de contaminantes. La industria automotriz realiza importantes inversiones (17% de su gasto) en el área de investigación y desarrollo orientados a la reducción del peso de los autos para satisfacer las reglamentaciones ambientales. La funcionalidad de estos desarrollos tecnológicos esta soportada en el diseño, fundición y forja con aceros avanzados de ultra - alta resistencia de diversos elementos del motor con secciones más delgadas, rígidas y tenaces como son: los cigüeñales, el árbol de levas, bielas, pistones y demás partes mecánicas optimizan y hacen de los motores de combustión interna una maquina cada vez más eficiente.

En términos generales, el Cigüeñal transforma el movimiento lineal de los pistones en un movimiento radial basado en el sistema simple de biela – manivela, generando el par motor. El Cigüeñal, se puede fabricar con fundiciones (gris o nodular) y aceros colados aleados para soportar los esfuerzos de torsión y flexión a los que se ve sometido, lo cual exige una combinación de alta resistencia y rigidez con una excelente tenacidad. En este sentido, los cigüeñales forjados con aceros de alta resistencia cumplen con estas propiedades mecánicas mencionadas de forma excepcional. Los aceros de medio carbono microaleados tipo 38MnVS han tenido una excelente aplicación en la forja de cigüeñales debido a que no requiere un tratamiento extra como el aplicado a los cigüeñales fabricados con un acero 4340. Sin embargo, los aceros 38MnVS aun requieren una mejora en su tenacidad.

En el presente trabajo, se desarrolló un proceso de fundición para determinar la composición química óptima que nos mejore las propiedades mecánicas de estos aceros de medio carbono. Se realizaron adiciones sistemáticas de vanadio para aumentar la resistencia

a la tensión y tierras raras para modificar la forma de las inclusiones no metálicas tipo MnS y acrecentar la tenacidad. Se obtuvieron lingotes redondos de 390 mm de largo con 89.1 de diámetro para ser forjados. De la nariz del cigüeñal forjado, se fabricaron probetas de tensión, dureza y metalográficas para su caracterización y su posterior correlación para determinar las variables óptimas de fundición y forja y por consecuencia, hacer las recomendaciones y adecuaciones pertinentes.

PROBLEMÁTICA

Este trabajo se desarrolló conjuntamente con la empresa Pintura estampado y montaje, S.A.P.I. de C.V (PEMSA) Celaya, Guanajuato, debido a la necesidad de la empresa PEMSА de incursionar en el mercado de piezas forjadas, teniendo como primer instancia la forja de cigüeñales, por lo que los resultados obtenidos establecieron el conocimiento básico y tecnológico para producir aceros con características superiores a los comerciales, de esta forma la empresa PEMSА logro realizar las pruebas de forja y así determinar su implementación en el mercado.

MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La industria automotriz en México ha mostrado un notable crecimiento en los últimos años, esto debido a los tratados con otros países que permiten que los automóviles mexicanos sean exportados a precios competitivos, así mismo, la calidad de estos automóviles ha adquirido una buena reputación, por lo tanto, diferentes industrias ensambladoras de automóviles, de marcas reconocidas, han llegado a nuestro país, esto ha traído como consecuencia la necesidad de fabricar componentes para la industria metal mecánica mexicana. Gran cantidad del acero que se consume en el país se importa, por lo que este estudio tiene la intención de proveer de información valiosa que contribuya al desarrollo de este tipo de aleaciones en nuestro país y además sirva como base para futuras investigaciones y como apoyo para la formación de recursos humanos.

SOLUCIÓN PROPUESTA

En este proyecto, se propuso un acero de medio carbono microaleado con Vanadio con adiciones de Tierras Raras para modificar las inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS) y mejorar la tenacidad del material. Se desarrolló un proceso de fundición en el cual mediante el cálculo de carga se obtuvieron las cantidades correspondientes para la fabricación de un acero de medio carbono microaleado al vanadio (0.11%V), así como sus elementos aleantes como lo son: Silicio (Si), Níquel (Ni), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), posteriormente, con el material obtenido en forma de lingotes de 390 mm de longitud con 89.1 mm de diámetro, fabricar un cigüeñal por medio del proceso de forja en caliente. De la nariz del cigüeñal forjado se obtuvieron probetas prototipo para pruebas mecánicas (ensayo de tensión norma ASTM E8 y ensayo de dureza norma ASTM E10-15) y pruebas metalográficas (tamaño de grano por método comparativo (ASTM E112-96), medición de la descarburación sobre la superficie y cuantificación de fases y compararlo con las propiedades de los cigüeñales utilizados comercialmente.

OBJETIVO

-El objetivo de este trabajo es desarrollar un proceso de fundición mediante coladas sistemáticas para la fabricación de un acero de medio carbono microaleado con vanadio destinado a la forja de cigüeñales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-Un primer objetivo específico es el determinar la composición química adecuada mediante la adición metódica de los elementos aleantes para evitar su volatilidad o pérdida de eficiencia durante la fusión y posterior colada.

-El segundo objetivo específico es la caracterización del acero de medio carbono microaleado con vanadio mediante ensayos mecánicos de tensión, dureza y metalografía para determinar su calidad en base a los estándares de este tipo de aceros utilizados en los procesos de forja.

METODOLOGÍA

En la primera parte de este trabajo de tesis, se realizó una revisión bibliográfica donde se presentan resultados actuales de gran relevancia sobre los procesos de fundición y forja. Posteriormente en el desarrollo experimental se describen los procesos realizados para la fabricación de los diferentes lingotes por fundición, así mismo se evaluaron sus propiedades mecánicas, en la última parte, se relacionan las propiedades mecánicas con su microestructura con la finalidad de proporcionar información valiosa para la posterior fabricación y forja de estos componentes por la empresa.

ANTECEDENTES

1.1 Aceros aplicados en Forja

1.1.1 Clasificación de aceros para forja

Para forja un material debe cumplir con dos requisitos básicos: (a) la resistencia del material (esfuerzo de fluencia) debe ser baja de modo que la presión del dado se sitúen dentro de las capacidades técnicas del material y construcción del mismo, y (b) la capacidad del material para deformarse sin fallar (forjabilidad). En la **Tabla 1.1** están un listado de metales y aleaciones en orden de acuerdo a su dificultad para forjar. Para un metal, el esfuerzo de fluencia y la forjabilidad se encuentran influenciados por las características metalúrgicas del material antes de forjar, temperaturas, esfuerzos, velocidades de deformación y esfuerzos que se producen en la deformación del material.

1.1.2 Aceros al carbón y de baja aleación

Los aceros al carbón y de baja aleación tienen una composición entre 0.10 y 1.00 por ciento de carbón y aproximadamente contienen un 5% de elementos de aleación metálicos (Ti, V, Cr, Ni, Mo etc), estos aceros son comúnmente los más usados para los procesos de forja en frío, tibio y caliente, y aunque existen diversos números de composiciones, todos los materiales que se encuentran dentro de esta clasificación tienden a tener el mismo comportamiento en la forja.

Usualmente la forjabilidad de un material aumenta con respecto al incremento de temperatura, sin embargo la temperatura para la forja de un material depende de factores tales como: contenido de carbono, elementos de aleación, temperatura óptima para la plasticidad y la reducción requerida para la pieza de trabajo. De estas variables el más significativo es el contenido de carbono, en la **Tabla 1.2** se muestra las temperaturas promedio de forja para los Aceros al carbón y de baja aleación.

Tabla 1.1. Forjabilidad de aceros y aleaciones.

Fuente: ASM Handbook (2013)

Metal o Aleación	Rango aproximado de temperatura de forjado, C°
<i>Menor dificultad</i>	
Aleaciones de aluminio.	400-500
Aleaciones de magnesio.	250-350
Aleaciones de cobre.	600-900
Aceros al carbón y de baja aleación.	850-1150
Aceros inoxidable martensíticos.	1100-1250
Aceros martensíticos.	1100-1250
Aceros inoxidable austeníticos.	1100-1250
Aleaciones de níquel.	1000-1150
Aceros inoxidable semiausteníticos PH.	1100-1250
Aleaciones de titanio.	700-950
Superaleaciones base hierro.	1050-1180
Superaleaciones base cobalto.	1180-1250
Aleaciones de niobio.	950-1150
Aleaciones de tantalio.	1050-1350
Aleaciones de molibdeno.	1150-1350
Superaleaciones base níquel.	1050-1200
Aleaciones de Tungsteno.	1200-1300
<i>Mayor dificultad</i>	

1.1.3 Tratamientos térmicos par aceros al carbón y de baja aleación

Los aceros al carbón y de baja aleación forjados, de acuerdo a la especificaciones del cliente son clasificados con cuatro principales características: (a) En calidad de forja (no existe ningún tipo de tratamiento térmico), (b) Tratamiento térmico para maquinabilidad, (c) Tratamiento térmico para propiedades mecánicas finales y (d) Tratamientos térmicos especiales.

En calidad de forja. La mayoría de los caeros forjados reciben un tratamiento térmico después de forja, los aceros de bajo carbono (0.10 – 0.25 % C) son usados en calidad de forja. En este estado la maquinabilidad es buena y es mínimo el aporte del tratamiento término al acero en términos de resistencia. Esta opción es económica y se obtienen resultados semejantes a los producidos por un normalizado.

Tabla 1.2. Aceros al carbón y de baja aleación para forja.
Fuente: ASM Handbook (2013)

Acero	Principales elementos de aleación	Temperatura promedio de forja. C°
Aceros al carbón		
1010	...	1315
1015	...	1315
1020	...	1290
1030	...	1290
1040	...	1260
1050	...	1260
1060	...	1180
1070	...	1150
1080	...	1205
1095	...	1175
Aceros aleados		
4130	Cromo, Molibdeno	1205
4140	Cromo, Molibdeno	1230
4320	Níquel, Cromo, Molibdeno	1230
4340	Níquel, Cromo, Molibdeno	1290
4615	Níquel, Molibdeno	1205
5160	Cromo	1205
6150	Cromo, vanadio	1215
8920	Níquel, Cromo, Molibdeno	1230
9310	Níquel, Cromo, Molibdeno	1230

Tratamientos térmicos para maquinabilidad. Es de vital importancia considerar el maquinado de la pieza después de la forja para optimizar la vida de la pieza, productividad o ambas, para ello se emplean el uso de tratamientos térmicos. El tratamiento adecuado para la maquinabilidad dependerá de factores: la máxima dureza deseada, especificaciones microestructurales, el tratamiento más económico, composición del acero, operaciones de maquinado, etc., Entre los tratamientos térmicos utilizados incluye: Recocido Total (full anneal), Recocido de proceso o Subcrítico (subcritical anneal), Revenido de esferoidización o globalización (spheroidize anneal), Normalizado y Normalizado con Revenido.

Tratamiento térmico para propiedades mecánicas finales. Los tratamientos térmicos de normalización o normalizado con revenido pueden producir la dureza mínima requerida y su resistencia a la tensión, sin embargo para la mayoría de los aceros, un endurecimiento (austenítico) y temple debe ir seguido por un revenido para disminuir los efectos producidos por el endurecimiento y conservar parte de la dureza y aumentando su tenacidad, obteniendo las propiedades mecánicas adecuadas.

Tratamientos térmicos especiales. Se utilizan para controlar la distorsión dimensional, aliviar tensiones residuales, evitar el agrietamiento, prevenir choques térmicos, etc., Aunque los tratamientos térmicos antes mencionados pueden aplicarse, algunas veces se requieren tratamientos muy específicos.

Muchas piezas como los cigüeñales, árbol de levas, engranes, anillos, rodamientos, etc., requieren una mayor dureza en la superficie para reducir el desgaste producido. Las superficies son endurecidas después del maquinado y se utilizan tratamientos superficiales como: endurecimientos por inducción, cementación, carbonitruración o nitruración.

1.1.4 Aceros microaleados

El uso de pequeñas cantidades de elementos aleantes como el Vanadio, Niobio, Titanio, etc., empezó a desarrollarse en la década de 1960 para controlar la microestructura y propiedades de los aceros de bajo carbono.

Los primeros acontecimientos empezaron a desarrollar láminas de aceros de bajo carbono aumentando su resistencia con los elementos aleantes, actualmente los aceros para forja se utiliza para aplicaciones que requieren una alta resistencia, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste, estas características pertenecen a los aceros de medio carbono (0.30 a 0.50 % C), por lo tanto en la actualidad el desarrollo de aceros microaleados se ha enfocado en estos.

La fuerza impulsora detrás del desarrollo de aceros microaleados de forja ha sido la necesidad de reducir los costos de fabricación. Esto se logra en estos materiales por medio de un tratamiento termomecánico simplificado (es decir, un control en la refrigeración

durante el proceso de forja en caliente) que alcanza las propiedades deseadas sin el temple y revenido requeridos por los aceros al carbono y aleados convencionales.

1.2 Características de un Cigüeñal

1.2.1 Tren motriz, (crank train)

De forma general, los motores de combustión interna son aquellos donde el trabajo, es producido debido a la reacción que se produce en la cámara de combustión en donde reacciona un combustible como la gasolina con un comburente que normalmente es oxígeno, además se requiere de un elemento que proporcione la energía de activación como es el caso de la chispa producida por la bujía. Tal reacción conocida como combustión, produce un aumento de temperatura y por lo tanto el incremento de presión de los gases, dando como resultado una expansión de tales gases que produce un movimiento mecánico que se aprovecha como fuente de energía o fuerza motriz. En esta tesis se entenderá por tren motriz al conjunto de motor, transmisión y árbol de transmisión. En la **Figura 1.1**, se muestra un diagrama general de las partes que componen el tren motriz.

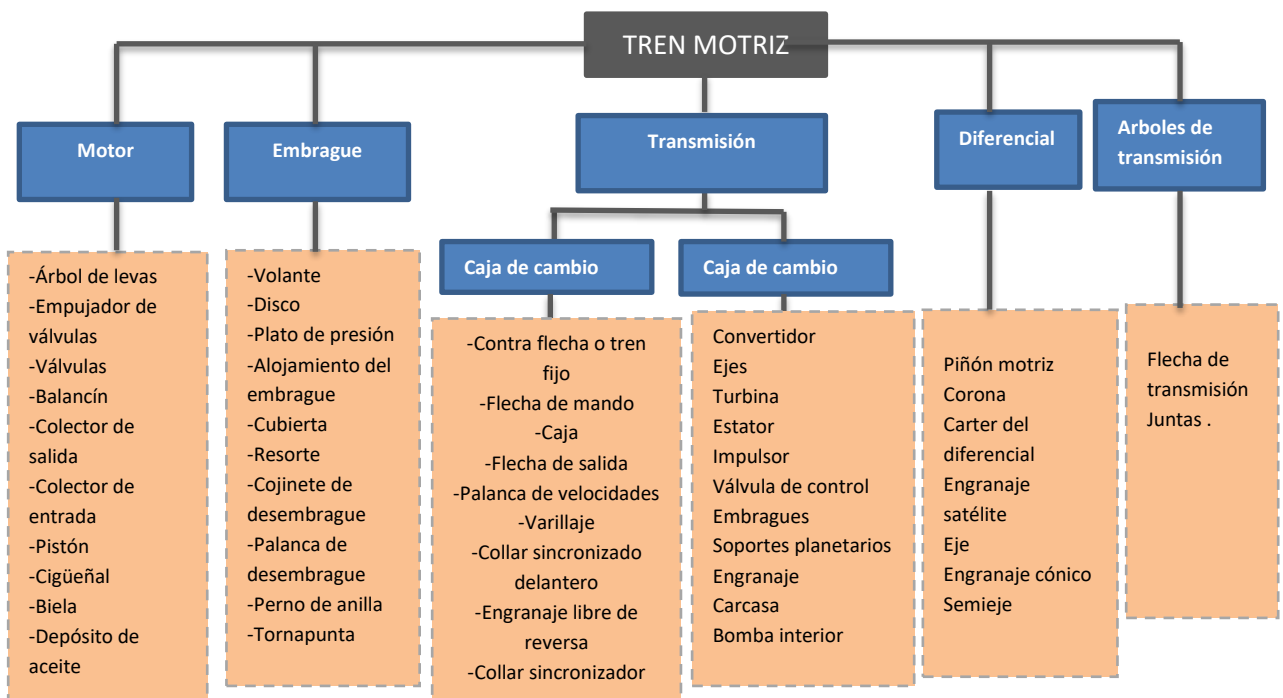


Figura 1.1. Esquema del tren motriz. (Castro Vicente, Miguel de 1985).

1.2.2 Cigüeñal y partes complementarias

El cigüeñal es el elemento encargado de transmitir la fuerza resultante de las detonaciones en el cilindro, estas detonaciones producen el movimiento de los pistones y estos a su vez están conectados con las bielas que hacen girar al cigüeñal. El giro o par del cigüeñal se transmitirá posteriormente a la cadena cinemática del motor, **Figura 1.2.**

El material utilizado en la fabricación de cigüeñales generalmente es de acero al carbono, en algunos casos si se solicita se pueden emplear aceros especiales al cromo-níquel o cromo-molibdeno-vanadio, tratados térmicamente, en autos de carreras en casos especiales se opta por un acero especial de alta resistencia endurecido por nitruración.

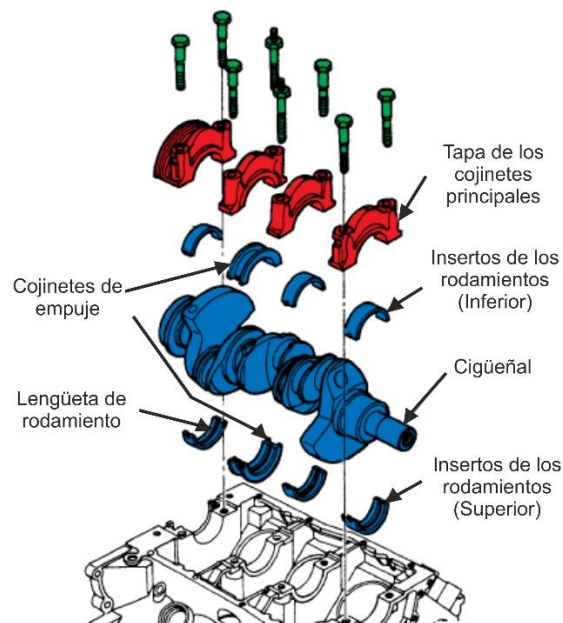


Figura 1.2. Cigüeñal y partes complementarias de un motor.

1.2.3 Partes del cigüeñal

El cigüeñal consta de diferentes partes, como se puede apreciar en la **Figura 1.3**.

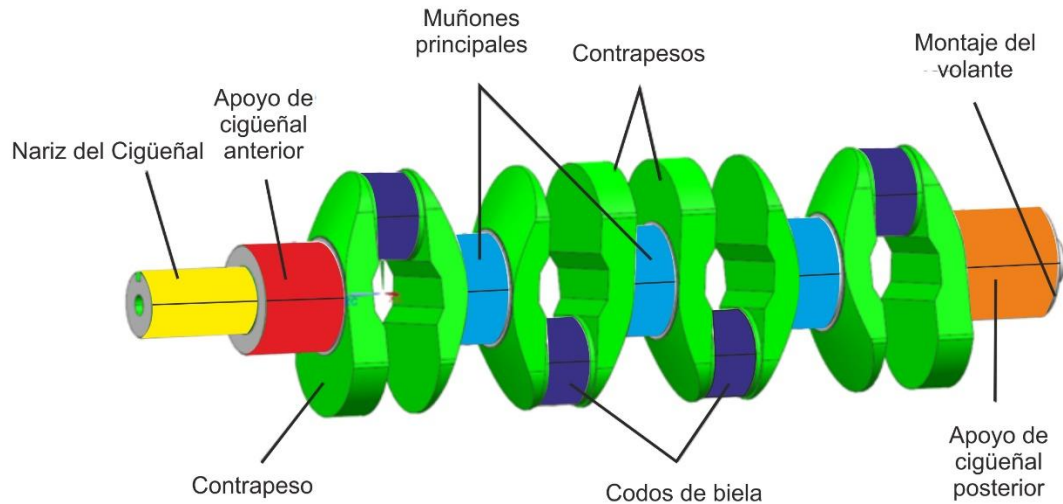


Figura 1.3. Partes del cigüeñal.

-Apoyos: muñones que se unen a la bancada, los cuales interponen dos semicojinetes, constituyendo el eje de giro del cigüeñal. El número de apoyos dependen del número de cilindros del motor y del nivel de rigidez que se desee conseguir en el cigüeñal, que irá en función de las prestaciones del motor.

-Codo de biela o muñequilla: Elementos sobre los que se embridan las cabezas de biela, con interposición de casquillos antifricción. El cigüeñal tendrá tantas muñequillas como número de cilindros.

-Contrapesos: son masas que forman parte del conjunto del cigüeñal y se sitúan diametralmente opuestas a las muñequillas para equilibrar entre el 50 y el 60 % de la masa rotativa

1.2.4 Esfuerzos a los que está sometido un cigüeñal

Los esfuerzos principales a los que está sometido el cigüeñal son:

Debido al par de giro generado por los cilindros en oposición al par resistente del movimiento del vehículo y de los pistones que han de ser arrastrados en las fases de admisión, compresión y escape este es sometido a un esfuerzo de torsión **Figura 1.4**.



Figura 1.4. Imagen esquemática del esfuerzo de torsión en un cigüeñal.

Otro esfuerzo al que se somete el cigüeñal es el esfuerzo de flexión, este es debido a la fuerza de la biela transmitida por la presión de los gases, sobre todo durante la expansión, que actúan sobre la muñequilla la cual está sujeta entre dos apoyos de la banca **Figura 1.5.**

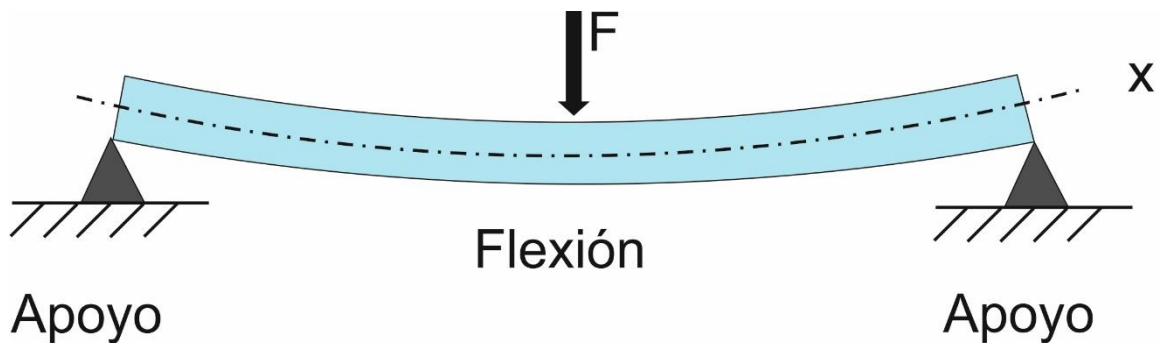


Figura 1.5. Deformación debida a la flexión.

El cigüeñal está expuesto además de los dos esfuerzos mencionados anteriormente, a vibraciones tanto en el sentido de la flexión como en el de la torsión debido a la irregularidad cíclica, ya que funciona a impulsos, cada vez que un cilindro está en fase de expansión.

El movimiento lineal y alternativo del pistón es transformado en rotatorio a través del mecanismo biela-manivela, siendo la manivela el brazo del cigüeñal, como se observa en la **Figura 1.6.**

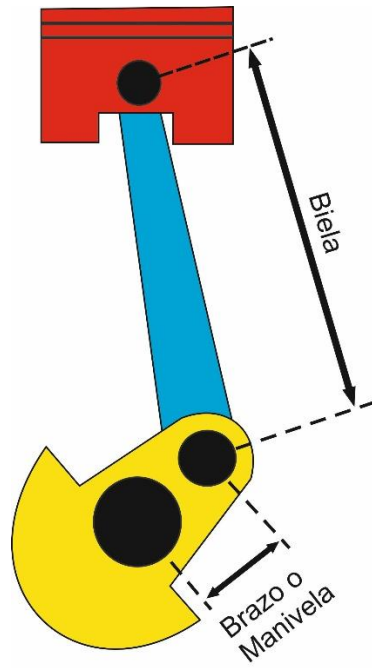


Figura 1.6. Esquema de mecanismo biela- manivela.

CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL PROCESO DE FORJA

2.1 El proceso de forja

La forja es un proceso metalmecánico, se define como la deformación controlada de un metal mediante la aplicación de presión o de impactos sucesivos hasta llegar a una forma final. La **Figura 2.1** muestra de forma ilustrativa una pieza producto del proceso de forja a alta temperatura. El uso de temperaturas elevadas facilita el proceso de forma, sin embargo la temperatura es otra variable a controlar que influencia fuertemente las propiedades de un material.



Figura 2.1. Acero forjado a alta temperatura.

2.2 Clasificación de los procesos de forja

Los procesos de forja se pueden dividir en dos grandes grupos; forja libre y forja con estampas, los cuales se detallan a continuación.

2.2.1 Forja libre

Características:

- No se confina el flujo de metal
- Utilizado para forjar piezas sencillas o para preformas destinadas a piezas complejas posteriores.
- Utillajes simples.

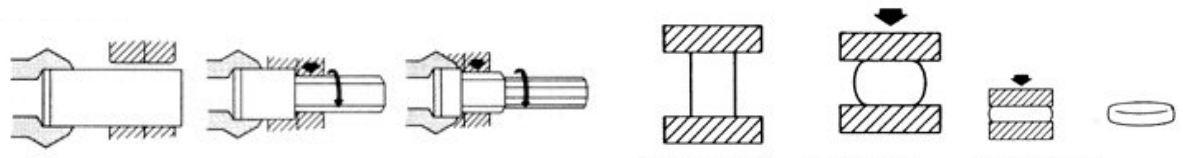


Figura 2.2. Forja libre de un eje y disco.

2.2.2 Forja con estampas

Características:

- El flujo del metal está limitado por la forma de los moldes.
- Los moldes (estampas) son caros y se obtienen por mecanizado. Soportan cargas y temperaturas elevadas.
- El exceso de material fluye hacia fuera formando la rebaba.

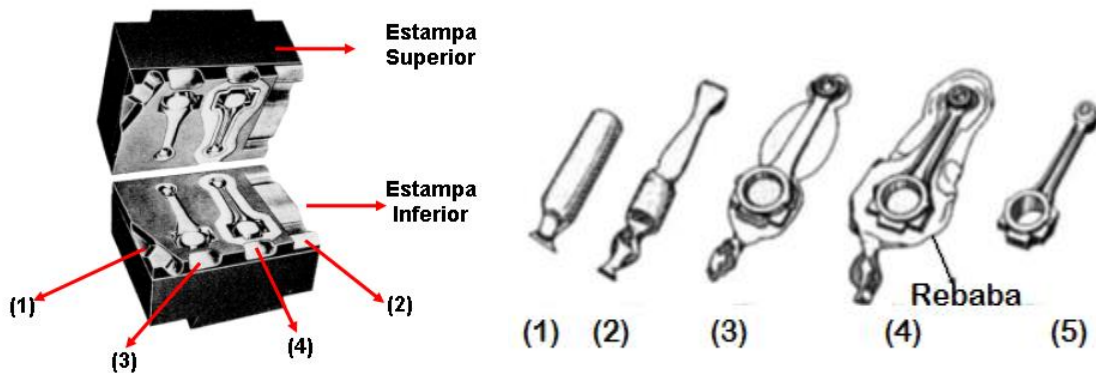


Figura 2.3. Imagen ilustrativa de una estampa y piezas producidas con este medio.

2.3 Etapas del proceso de forja

La forja se realiza con tres fases:

- Calentamiento; dependiendo del material a forjar deberá ser el calentamiento con la temperatura adecuada controlada.
- Operación de forja.
- Enfriamiento.

Las etapas se describen a continuación.

Calentamiento:

Cuando el metal utilizado en el proceso de deformación se encuentra a la temperatura máxima posible, sin alcanzar el punto de fusión., durante la deformación debemos considerar las energías mecánicas que son transmitidas a la pieza, producido por la presión de la prensa, esta energía se transformara en calor, la cual provoca un sobrecalentamiento. Si durante el proceso de forja se prolonga más del tiempo debido puede provocar un enfriamiento excesivo hasta sobrepasar descendiendo la temperatura de re-cristalización. La forja en caliente requiere el mínimo de energía en el forjado y produce la máxima deformación, pero al forjar cuesta controlar las dimensiones del producto ya que el metal no se contrae uniformemente cuando se enfría de ahí que la forja se realice a menudo a temperatura ambiente, aunque la deformabilidad del metal es algo menor.

Deformación:

La deformación producida en la forja es debida a esfuerzos de la compresión, esta fuerza necesaria para la deformación es denominada "carga de forja" y se deduce para un metal en particular, por la compresión de probetas cilíndricas entre matrices planas y paralelas bien lubricadas.

A temperatura de trabajo en frío las tensiones son elevadas y esto se debe a la dificultad de mover las dislocaciones a través de la red ya que éstas se multiplican rápidamente conduciendo a un endurecimiento por trabajo y los límites de deformabilidad son bajos. Cuando se trabaja en caliente los niveles de tensión son más bajos ya que la energía térmica ocasiona grandes fluctuaciones de los átomos con las redes cristalinas, de los granos del metal alrededor de sus posiciones de equilibrio.

La estructura de un metal puede cambiar tan drásticamente durante el trabajo en caliente, que el resultado es un ablandamiento que puede ocasionar una exagerada deformación no uniforme. La deformabilidad también depende del tamaño de los granos, un tamaño de grano grande es difícil de forjar.

En una operación de forja real, la carga y la presión de forja depende marcadamente de la fricción entre las matrices y la pieza de trabajo, así como del límite de fluencia del metal de la pieza. Bajo condiciones de lubricación perfectas la presión requerida para forjar una muestra cilíndrica es uniforme e igual al límite de fluencia del material.

Enfriamiento:

Se produce constantemente desde que sale la pieza del horno para ser forjada. Este enfriamiento no puede ser brusco para evitar grietas por contracciones rápidas. Durante la forja el enfriamiento tiene lugar por radiación al ambiente o por conducción a la matriz o estampa. Si la forja es con martinete, la pieza está menos tiempo en contacto con la matriz que cuando se trabaja con una prensa por tanto el enfriamiento es menos rápido. Influye considerablemente el tamaño de la pieza, ya que las piezas grandes se agrietan con más facilidad que las pequeñas a causa de las tensiones que se originan por la desigualdad de enfriamiento entre la periferia y el núcleo. Una vez terminada la forja el enfriamiento puede hacerse al aire. Otros factores a considerar son la velocidad de calentamiento y la atmósfera en el horno.

2.4 Características de los productos forjados

Los productos que se realizan por medio del proceso de forja tienen grandes características, como puede ser la fácil repetitividad del proceso esto ayuda a que todos los productos que se obtienen por este proceso se realicen constantemente, obteniendo excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la fatiga, tenacidad, ductilidad y resistencia a la corrosión lo cual se debe a la integridad metalúrgica y al fibrado direccional del material.

2.5 Consideraciones en el diseño de productos forjados

El proceso de forja tiene distintas limitaciones que deben ser consideradas en el diseño de una pieza a ser fabricada por este medio, dentro de las limitaciones de diseño de productos forjados tenemos:

- Necesidad de ángulos de salida en las paredes verticales.
- Necesidad de radios de acuerdo: no es posible forjar aristas vivas.
- Difícil forjar paredes muy delgadas.
- Tolerancias y acabado superficial pobres.
- No es posible forjar agujeros de pequeño diámetro.

2.6 Máquinas para el proceso de forja de un Cigüeñal

Los equipos para el proceso de forja se pueden dividir en dos grandes grupos: prensas y martillos.

Prensas: proporcionan una deformación homogénea del material y mejores tolerancias que los martillos.

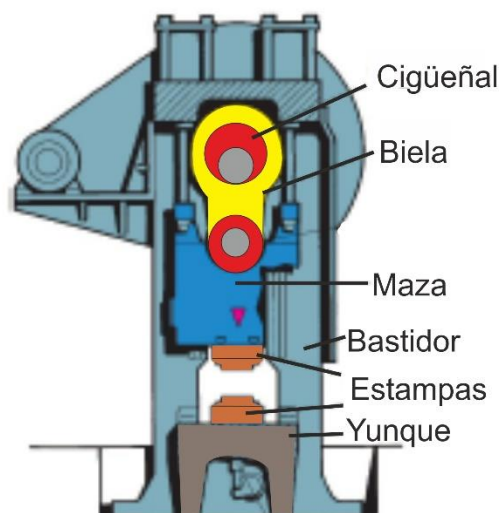


Figura 2.4. Esquema de una prensa utilizada en el proceso de forja.

Su capacidad viene definida por la fuerza disponible en la carrera de baja de la estampa.

Se clasifica en función del mecanismo utilizado para el movimiento de la estampa superior.

Prensa mecánica: maquinaria que, a través de un volante de inercia, acapara energía y la transmite por vía neumática o mecánica a una matriz o un troquel. Estas prensas, por lo tanto, permiten realizar el proceso conocido como troquelación (la concreción de agujeros en materiales muy diversos, como cartones, plásticos o metales).

-Mecanismo de biela-manivela (energía almacenada en un volante de inercia).

-Fuerza y velocidad dependen de la cinemática de la prensa.

Prensa hidráulica: Caracterizada por la alta potencia de sus bombas lo que garantiza el poder forjar a altas velocidades para lograr mayores productividades.

Accionada por un cilindro hidráulico servo controlado.

-Fuerza y velocidad dependen del caudal y presión en el cilindro hidráulico.

-Menor productividad que las mecánicas.

-Adecuadas para forja libre de grandes piezas: capaces de grandes fuerzas y control exhaustivo de la posición de la estampa superior.

-Más caras y mayor mantenimiento que las mecánicas.

Martillos: aplicación de impactos sucesivos sobre el material.

-Proporcionan una deformación más superficial que las prensas.

-En general son más baratos y flexibles que las prensas.

-Su capacidad viene definida por la energía disponible en el momento del impacto.

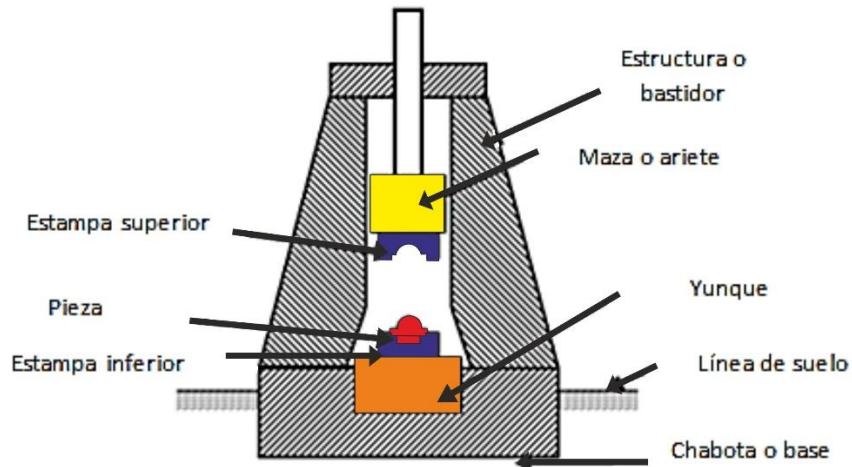


Figura 2.5. Esquema de las partes que componen un martillo para forja.

2.7 Características relevantes de calidad en productos forjados

Las piezas que son fabricadas por el proceso de forja deben cumplir con ciertas especificaciones, el proceso de forma modifica las propiedades del material a partir del cual están fabricadas las partes.

La estructura típica de solidificación de un lingote se muestra en la **Figura 2.6**, esta estructura consta de 3 zonas; la zona chill o zona de enfriamiento rápido, debido a la rápida extracción de calor por el contacto con el molde, la zona columnar, debido a la disminución de la temperatura y con un crecimiento de los granos orientados en sentido paralelo a la extracción de calor y por último la zona equiaxial, la cual se forma por sobreenfriamiento, ya sea por efectos térmicos o sobreenfriamiento constitucional.

El proceso de forja así como el proceso de laminación destruyen la estructura típica de solidificación de un lingote, para producir por medio de recristalización granos equiaxiales y de menor tamaño, lo que trae consigo una mejora las propiedades del material en el sentido longitudinal, y disminuyen en sentido transversal, el acero forjado es un material anisotrópico, es decir, presenta diferentes propiedades en diferentes direcciones. En el caso de una fundición, el material es isotrópico, es decir, presenta propiedades iguales o muy similares en todas direcciones.

La modificación de sus propiedades mecánicas es atribuida a la modificación de su microestructura, normalmente con el debido control de temperatura y deformación se produce un refinamiento de la microestructura, disminución del tamaño de grano y cambios en su morfología, produciendo así, la mejora de las propiedades mecánicas.

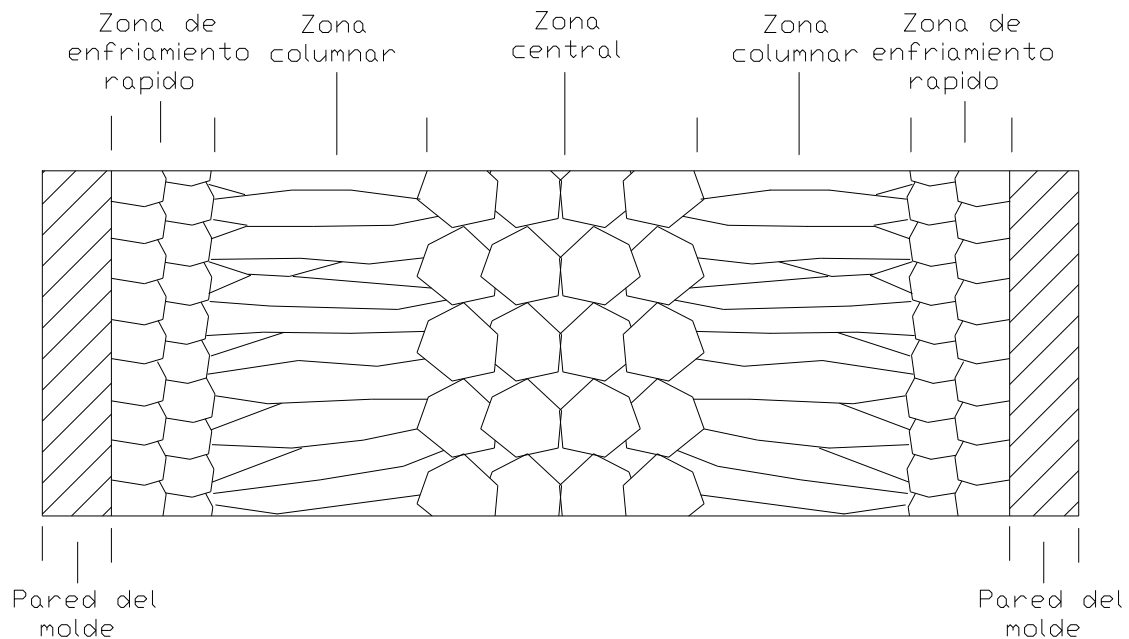


Figura 2.6. Estructura típica de solidificación de un lingote.

Por lo tanto existen especificaciones para las propiedades de estos materiales en ambos sentidos, longitudinal y transversal. Las propiedades de estos por lo tanto dependerán de la calidad del material base (fundición) las cuales dependen a su vez del tipo y la proporción de fases presentes, segregación, inclusiones y defectos como es el caso de las porosidades. Por otra parte, las propiedades también tendrán una gran dependencia de los parámetros del proceso de forja, como son; temperaturas de procesamiento, grado de deformación, homogenización, velocidades de enfriamiento así como esfuerzos residuales.

Recientemente se han desarrollado nuevos métodos para lograr una combinación de propiedades mecánicas adecuadas para determinada aplicación, como son los procesos de recristalización dinámica durante el proceso de forja en aceros 38MnVS [1,2].

CAPÍTULO 3

CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

3.1 Introducción

La fundición de metales es uno de los procesos más antiguo que se remonta cerca de 4000 A.C. El descubrimiento del cobre dio pie al inicio de la fundición de metales, este descubrimiento fue sin duda una innovación significativa que cambiaría el rumbo de la historia. Con la fundición se pudieron crear formas más complejas que por el método de forja de ese tiempo, se fabricaron armas, herramientas, joyas más sofisticadas y refinadas. No tardó en descubrirse que la mezcla de cobre y bronce producía mejores resultados que el cobre solo y así empezaron a descubrirse las primeras aleaciones. [3]

El principio de la fundición es simple, el metal líquido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde, donde se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde, Aunque existen muchos factores y variables que tenemos que controlar para obtener una operación exitosa.

Existen diversos métodos para la fundición, lo cual hace de este proceso uno de los más versátiles en manufactura, sus principales ventajas son: [3]

- Se pueden crear geometrías complejas (Internas y externas).
- Algunos procesos pueden producir partes de forma neta (No requieren operaciones subsiguientes).
- Se puede usar para producir partes muy grandes que pueden pesar más de 100 toneladas.
- El proceso es aplicable para cualquier metal que al calentarse pueda pasar a estado líquido.
- Algunos procesos de fundición son adaptables a la producción en masa.



Figura 3.1. Primeras fundiciones en el 4000 a.C.

3.2 Clasificación de fundición

Fundición gris

En la fundición gris la parte del contenido de carbono en el hierro gris se presenta en forma de escamas o láminas de grafito, las cuales dan al hierro su color y sus propiedades deseables. El hierro gris es fácil de maquinar, tiene alta capacidad de templado y buena fluidez para el colado, pero es quebradizo y de baja resistencia a la tracción. [4]

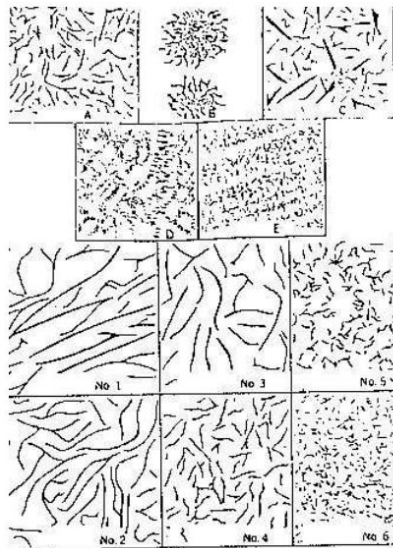


Figura 3.2. Clasificación de las láminas de grafito.

Fundición blanca

Se forma al enfriar rápidamente la fundición de hierro desde el estado líquido, que dan por resultado una microestructura en la que gran parte del carbono se combina con cementita.

Al enfriarse las fundiciones desde 1130°C hasta 723 °C ayuda a evitar la grafitización de la cementita aunque si se calienta la pieza colada a una temperatura de 870°C, el grafito se forma adoptando una forma característica denominada “carbono de revenido”, resultando la fundición maleable.[4]

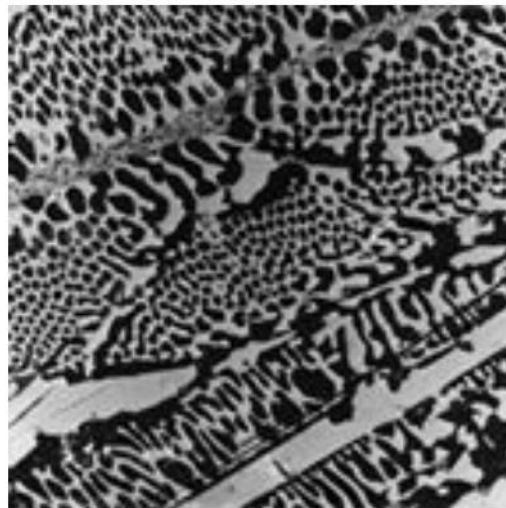


Figura 3.3. Microestructura de la fundición blanca.

Fundición nodular (dúctil o esferoidal)

La fundición nodular, dúctil o esferoidal se produce en hornos cubilotes, con la fusión de arrabio y chatarra mezclados con coque y piedra caliza. Para producir la estructura nodular, el hierro fundido que sale del horno se le añade una pequeña cantidad de materiales como magnesio, cerio, o ambos. Esta microestructura produce propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia, buen maquinado, buena fluidez para la colada, buena endurecibilidad y tenacidad. No puede ser tan dura como la fundición blanca, salvo que la

sometan a un tratamiento térmico. Este tipo de fundición se caracteriza por que el grafito aparece en forma de esferas minúsculas. [4]

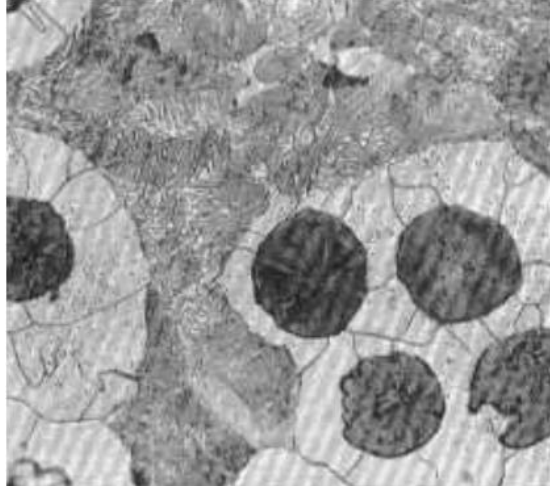


Figura 3.4. Microestructura del hierro Nodular.

Fundición aleada

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen Ni, Cr, Mo, Cu, etc., en porcentajes suficientes para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones ordinarias o para comunicarle alguna otra propiedad especial, como alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión.[4]

Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia

De una forma general, se pueden clasificar las fundiciones aleadas en dos grupos:[4]

- Fundiciones de baja y media aleación, que se caracterizan por tener pequeñas cantidades de Ni, Cr, Mo, y Cu, generalmente en porcentajes inferiores a 5%. Son fundiciones de alta resistencia a la tracción, de 25 a 50kg/mm², muy superior a la de las fundiciones ordinarias. Estas en general cuentan con una estructura perlítica, sorbítica, bainítica y martensítica. También pertenecen a este grupo de fundiciones

de baja aleación las fundiciones con 1 a 2% de cromo resistente al calor y las fundiciones martensíticas muy resistentes al desgaste.

- Fundiciones de alta resistencia a la tracción, se observa una gran variedad de fundiciones de composiciones muy diversas y resistencia a la tracción, variables de 25 a 50 kg/mm². A este grupo pertenecen ciertas fundiciones al níquel, cromo, cromo-níquel, cobre, etcétera, evitando la formación de láminas de grafito, aumentando la resistencia.

Fundición de aceros

Los aceros son fabricados comúnmente por un proceso que involucra la fundición, sin embargo la gran mayoría son sometidos a procesamientos posteriores los cuales modifican su estructura y por lo tanto, sus propiedades.

Los aceros son obtenidos a partir de mineral de hierro y carbón mineral conocido como coque y caliza como fundente. La reducción del mineral de hierro en el alto horno da como producto el Arrabio. El Arrabio es una aleación de hierro con alto contenido de carbono (alrededor de un 4%). Posteriormente, el arrabio es procesado, con la finalidad de disminuir el contenido de carbono para producir así un acero. Ya que el acero se define como una aleación de hierro y carbono, donde el contenido de carbono es menor al 2%, contenidos de carbono mayores dan como producto las fundiciones las cuales se detallaron anteriormente. El diagrama hierro-carburo de hierro de la **Figura 3.5** muestra tal división.

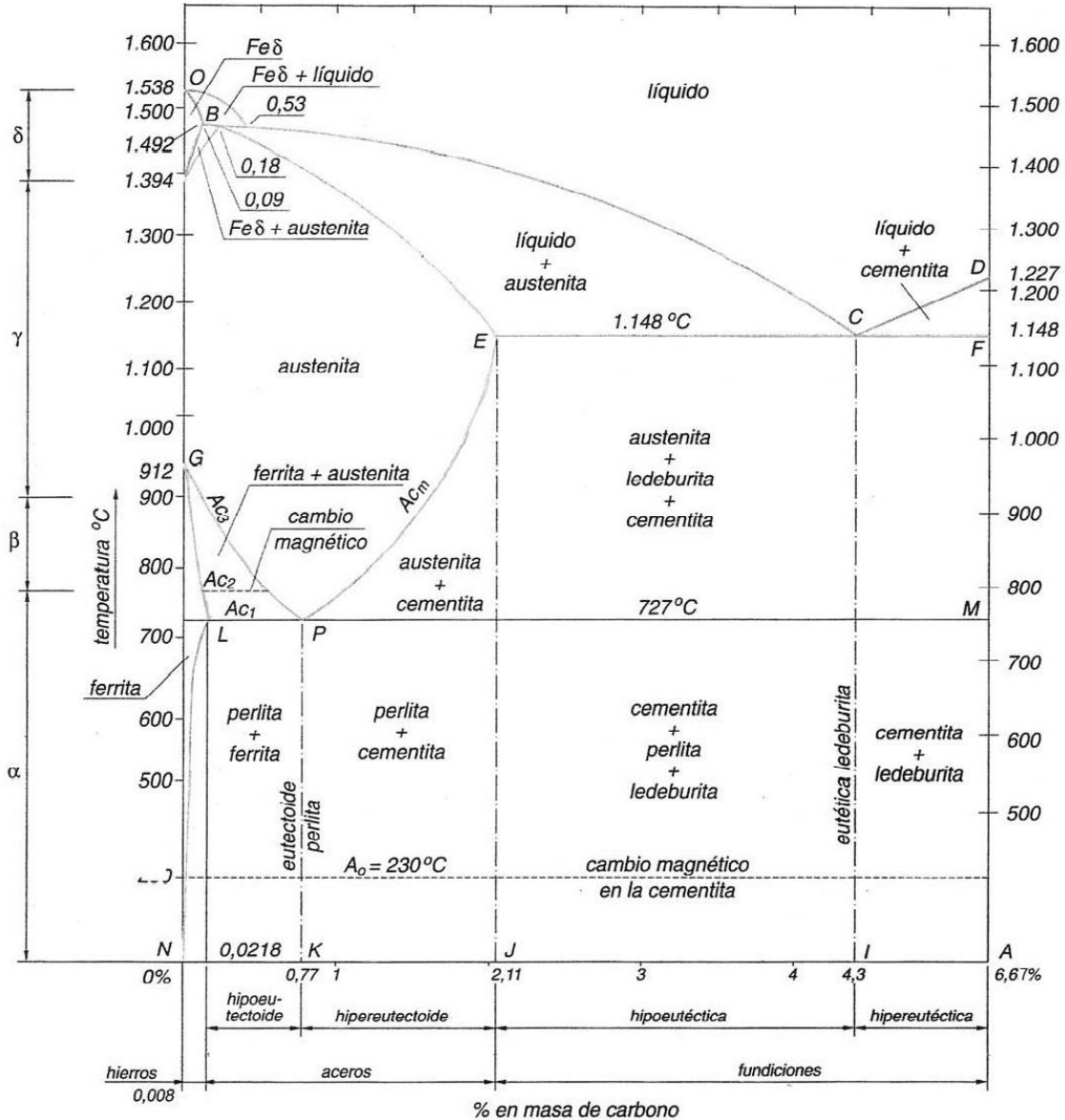


Figura 3.5. Diagrama hierro-carburo de hierro [5, 6].

El proceso de refinamiento para disminuir el contenido de carbono se realiza en un horno básico de oxígeno (BOF) y antiguamente en hornos de crisol abierto, en el caso de los hornos BOF, los cuales tienen su origen en los convertidores Bessemer, se inyecta oxígeno a presión con lo anterior, las impurezas (carbón, fósforo, azufre, silicio, etc) son eliminadas, además, el oxígeno reacciona con el carbono del arrabio produciendo así bióxido de carbono ó monóxido de carbono por lo que este se elimina y se obtiene el acero.

Posteriormente el acero líquido se transporta para ser vaciado y solidificado, en un molde de cobre oscilante enfriado por agua, este proceso es conocido como colada continua. El producto del proceso de colada continua es un planchón que es cortado y posteriormente sometido a un proceso de laminación. El proceso de colada continua no aplica únicamente a planchones, actualmente se producen también barras de diferentes diámetros, posteriormente, estas barras son procesadas termo-mecánicamente, para dar origen a diferentes productos. Los aceros también pueden ser utilizados para producir piezas directo de fundición, normalmente este proceso se realiza a partir de la refusión del acero producido con el método antes descrito.

Para este proyecto se realizó la fabricación de forma individual de cada uno de los lingotes, a partir de acero y arrabio previamente fundido para asegurar un control adecuado sobre la composición y propiedades resultantes, algunos procesos de fundición se describen a continuación, en la mayoría de los casos se procede de forma similar, a partir de la refusión de acero de alta calidad, estos procesos también son aplicables a los hierros y aleaciones de aluminio.

3.3 Procesos de fundición

La realización de este proceso empieza lógicamente con el molde. La cavidad de este debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionado, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferente porcentaje de contracción, por lo tanto si la presión dimensional es crítica la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir. [4]

Proceso

Se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido (1720°C), después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta.

En un molde cerrado existe una vía de paso llamada sistema de vaciado que permite el flujo del metal fundido desde afuera del molde hasta la cavidad, este es el más importante en operaciones de fundición.

Cuando el material fundido en el molde empieza a enfriarse hasta la temperatura suficiente para el punto de congelación de un metal puro, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. [4]

Los procesos de fundición se pueden clasificar según el tipo de molde que utilicen: moldes permanentes o moldes desechables de diferentes materiales, estos procesos se detallan a continuación.

3.4 Etapas del proceso de fundición

Todo proceso de fundición tiene una serie de etapas:

- 1.- Como primer etapa se realiza la fase de diseño de producto. En esta fase se define el material del cual ha de estar constituido, se define la geometría del producto.
- 2.- Etapa del modelo, el cual consiste en el diseño y construcción del molde, en este se considera una serie de condiciones, como el diseño de un molde con una permeabilidad adecuada, la capacidad de contracción del mismo y la evacuación de gases.
- 3.- Como tercer etapa se lleva a cabo la preparación del metal de trabajo para su posterior en la cavidad del modelo. En esta fase se deberá proteger el metal de trabajo frente a la contaminación, para reducir el riesgo de contaminación del metal por óxidos y gases, además se debe controlar la correcta dosificación de los conductos y temperatura del metal fundido.
- 4.- En esta etapa se vierte el metal fundido en la cavidad del molde hasta completar su llenado. Las características del producto final están condicionadas por los parámetros de colada que pueden ser velocidad de vertido, la sección de los conductos, la temperatura del metal fundido, etc.
- 5.- Al completar el llenado del molde, se tiene lugar al comienzo de enfriamiento y solidificación, de las cuales se debe controlar diferentes factores tales como la porosidad por contracción de la pieza y el tamaño de grano del metal.

6.- La etapa del desmolde consiste en la extracción de la pieza fabricada del molde.

7.- Finalmente, en algunos casos se efectúa la limpieza de la superficie de la pieza, se le somete a un proceso de acabado y se verifican las especificaciones del producto tales como las tolerancias dimensionales y acabados superficiales.

3.5 Diseño del producto

Para lograr un correcto producto usando como proceso seleccionado la fundición, es necesario seguir algunas observaciones para evitar diferentes defectos que se pudieran presentar.

A continuación se presentan algunas consideraciones importantes [8].

- **Simplicidad de la geometría.** Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir formas complejas, la simplificación del diseño propiciara una fundición fácil y eficiente.
- **Esquinas.** Deben evitarse esquinas y ángulos, ya que son fuente de concentraciones de esfuerzos y pueden causar desgarramiento y grietas en la fundición. Además pueden dificultar su extracción del molde.
- **Espesores de sección.** Los espesores de sección deben ser uniformes a fin de prevenir bolsas de contracción.
- **Tolerancias dimensionales y acabado superficial.** Se pueden lograr diferencias significativas en la precisión dimensional y en los acabados de la fundición dependiendo del proceso que se use.

3.6 Tipos de moldes

Moldes desechables

Los procesos de molde desechable implican que para sacar la pieza fundida se debe destruir el molde que la contiene, haciendo de este un proceso con velocidades de producción bajas.

Fundición en arena. El trabajar con arena permite trabajar metales con altos puntos de fundición como el acero y el níquel. El proceso general de la fundición en arena comienza con la fabricación del modelo de la pieza a fundir, luego este modelo se coloca entre la arena para generar una cavidad negativa y se ubican los sistemas de alimentación que guiaran el metal fundido hacia las cavidades del molde. Una vez el metal se solidifica al interior de la cavidad, se destruye el molde y se extrae la pieza terminada; si se requiere se puede realizar el proceso de tratamiento térmico a la pieza fundida o realizar los procesos adicionales de acabados y controles necesarios. [7]

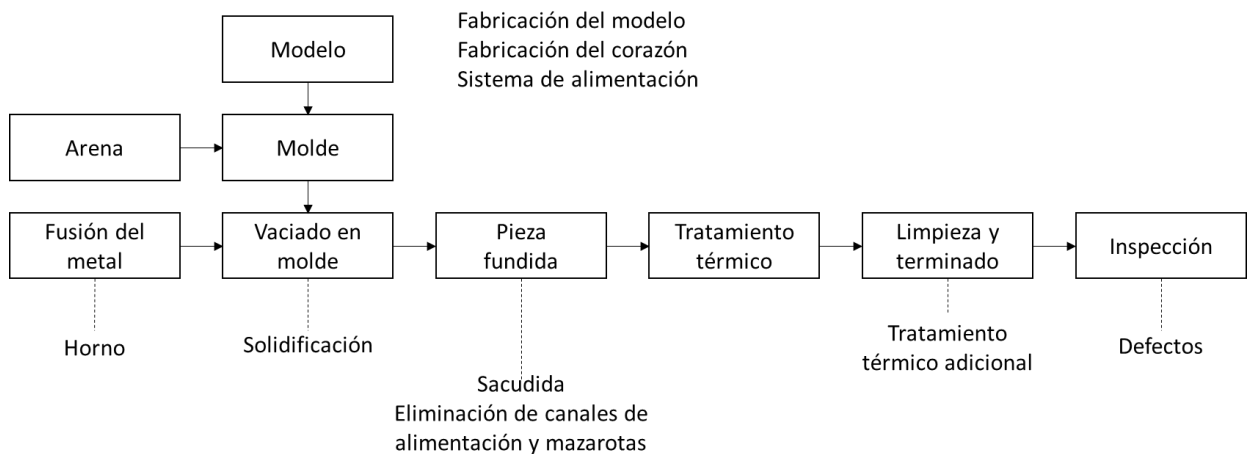


Figura 3.6. Pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.

Arena. Para los procesos de fundición en arena se utiliza arena de sílice (SiO_2), debido a su economía y resistencia a altas temperaturas. Uno de los factores más importantes en la selección de la arena es el tamaño del grano. Los granos finos permiten un mejor acabado superficial de la cavidad y así de la pieza; sin embargo los granos finos reducen la permeabilidad del molde. Para lograr una forma estable y mejorar la resistencia del molde

la arena se mezcla de forma homogénea con bentonita la cual funciona como aglutinante. Durante el proceso se tamiza la arena, de tal forma que la arena más fina es la que entra en contacto con el modelo y la arena más gruesa da el cuerpo al molde y permite la salida de gases. También se pueden agregar resinas o aglutinantes orgánicos o inorgánicos a la arena para darle mayor resistencia durante el proceso de fundición. [7]

Fundición en moldes permanentes

Los moldes permanentes por lo general se componen de dos mitades metálicas que al unirse generan la cavidad y todo el sistema de alimentación; estas dos mitades se fabrican maquinadas, lo cual garantiza muy buen acabado superficial y una alta precisión dimensional de los productos fundidos. Al iniciar el proceso las dos mitades del molde se sujetan juntas y se precalientan para evitar el choque térmico entre el metal fundido y la cavidad del molde, esto también facilita el flujo del metal y la calidad de la fundición. El molde inicia su enfriamiento mediante canales de refrigeración para poder proceder a extraer la pieza solidificada.

Los metales típicos a fundir en moldes permanentes son las aleaciones de aluminio, magnesio y cobre

Fundición en molde permanente por gravedad. Este es el proceso más sencillo de fundición en molde permanente; en este el metal fundido se vierte dentro de la cavidad y solo se utiliza la fuerza de la gravedad para garantizar que toda la cavidad se llene del metal. [7]

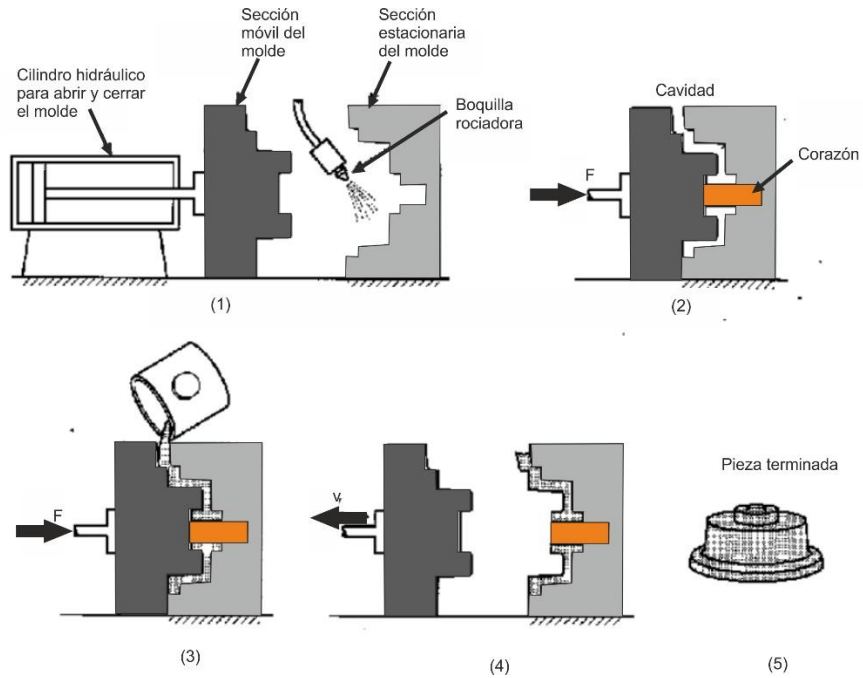


Figura 3.7. Fundición en molde permanente por gravedad.

Fundición en molde permanente a baja presión. En la fundición a baja presión el metal líquido fluye debido a una presión que se aplica desde abajo y lo obliga a llenar la cavidad del molde, una gran ventaja de este procedimiento es que el metal pasa directamente del crisol al molde sin estar expuesto al aire. Esto disminuye la porosidad producida por el gas y los defectos generados por la oxidación. [7]

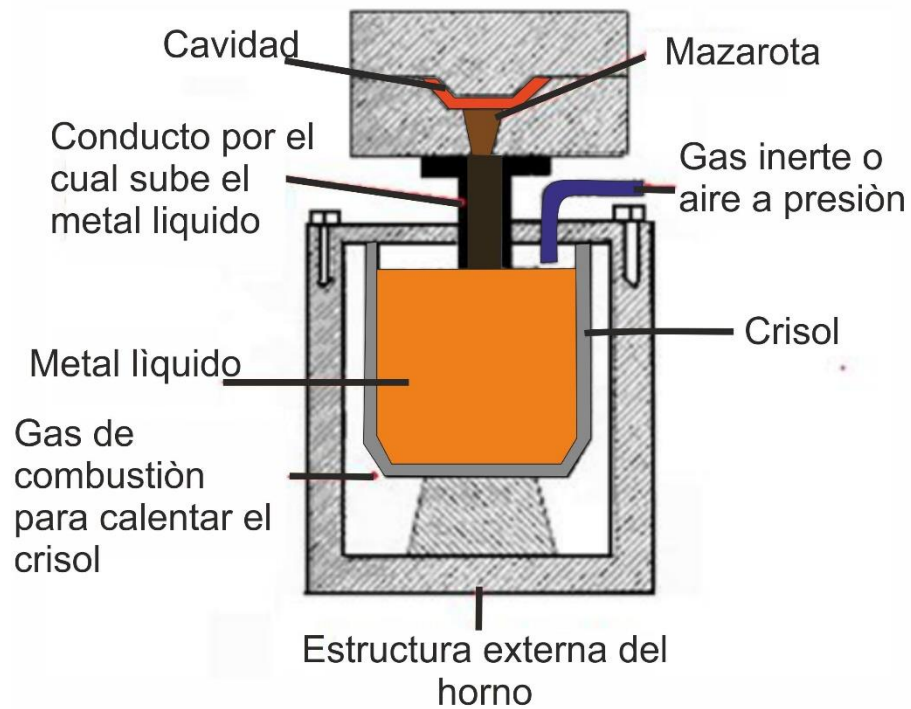


Figura 3.8. Molde permanente a baja presión.

Fundición en molde permanente a alta presión. En este método también conocido como inyección en matriz o dado, el metal es forzado por un pistón a llenar el molde gracias a presiones de hasta 100.000 psi; esta presión se debe mantener hasta que la pieza se solidifica y se puede retirar de la cavidad. Los moldes suelen recibir el nombre de dados [7].

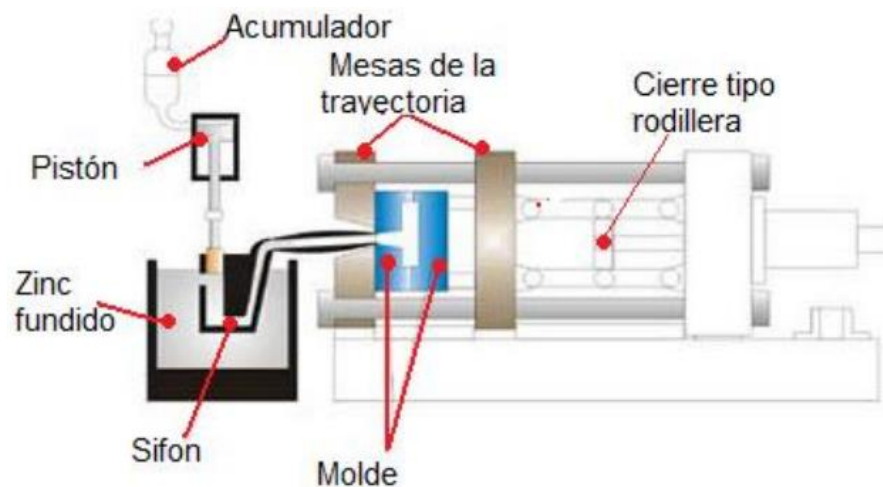


Figura 3.9. Fundición en molde permanente a alta presión.

3.7 Efecto de los elementos aleantes en el acero (%C, Mn, Si, V, Ca, Cr, Mo, Cu)

La función de introducir elementos aleantes en un acero de medio carbono (0.30 a 0.50 % C), es el endurecimiento de ferrita por refinamientos de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por solución sólida.

A continuación se describen elementos aleantes que se utilizan en los aceros para forja en caliente [9,10]:

Carbono. Forma considerablemente la cantidad de perlita (la perlita es responsable del endurecimiento del material) en la microestructura con cantidades que van desde 0.30 a 0.50 % C, sin embargo, el alto contenido de este elemento reduce la solubilidad de los demás elementos aleantes en la fase austenítica, además, controla las principales propiedades del acero (dureza, resistencia, endurecimiento por temple, incremento de la tenacidad por revenido, etc.) y son directamente proporcionales al contenido de carbono .

Manganeso. Este elemento se utiliza en cantidades relativamente grandes (1.4 a 1.5%), el manganeso proporciona un fortalecimiento por solución sólida, aumenta la solubilidad de los carburos de vanadio (mejora el endurecimiento por precipitación), además ayuda a reducir la temperatura de transformación austenita-ferrita, se usa para aumentar la resistencia y la dureza de los aceros con retención de su tenacidad y, en los aceros con deliberada adición de azufre (grados resulfurados) para minimizar la fragilidad resultante, tanto en caliente como en frío .

Silicio. Es un elemento formador de ferrita, es utilizado en cantidades de 0.30% en aceros para forja, además de efecto como desoxidante en estado de metal líquido su efecto es considerado en el mejoramiento del esfuerzo de cedencia y la tenacidad, además ayuda a mejorar la fluidez del acero, lo cual es una propiedad importante en la fabricación de piezas por fundición.

Cobre. Es agregado en cantidades de 0.20% para aumentar su resistencia a la corrosión atmosférica, en cantidades de 0.50% mejora la resistencia por endurecimiento de ferrita, acompañado de un ligero decremento en su ductilidad.

Cromo. Aumenta la profundidad del endurecimiento, mejora la resistencia al desgaste y al igual que el cobre aumenta su resistencia a la corrosión.

Calcio. El calcio se considera un poderoso desoxidante y un poderoso desulfurante en combinación con el silicio, sin embargo el principal efecto del calcio es que se obtiene un excelente control sobre la distribución de las inclusiones no metálicas, logrando una mejora en las propiedades mecánicas.[11, 12, 15]. Sin embargo su contenido se debe de controlar ya que es considerado un elemento indeseable que disminuye las propiedades mecánicas si se utiliza en exceso debido a la formación de compuestos indeseables [16].

Elementos de las tierras raras. Tales como el cerio, lantano y praseodimio son utilizados para el control de forma de inclusiones de sulfuros. Estos elementos se están dejando de utilizar debido a que producen aceros “sucios” y se prefiere el calcio para controlar la forma de la inclusión. Tal es el caso del lantano, del cual, si se excede su contenido crítico, da origen a otro tipo de inclusiones que disminuyen notablemente las propiedades mecánicas [17].

Niobio. Pequeñas cantidades de hasta 0.05% incrementan el esfuerzo de cedencia por una combinación de endurecimiento por precipitados y refinamiento de grano. En algunas ocasiones el niobio se usa en combinación con el Vanadio para obtener los beneficios del control del tamaño de grano y la precipitación por carburos.

Titanio. Este elemento al igual que el Vanadio y el Niobio provee el endurecimiento por precipitación, pequeñas adiciones de este elemento controlan el crecimiento de grano austenítico.

Vanadio. Los elementos disponibles para realizar un endurecimiento por precipitación (microaleación) son principalmente el niobio, titanio y vanadio. De éstos, la microaleación con vanadio es la preferida por varias razones. En primer lugar, y probablemente la más

importante, es la alta solubilidad del carbonitruro de vanadio [V (C, N)] en comparación con las otras alternativas (niobio y titanio), permite que el vanadio se disuelva durante temperaturas normales de recalentamiento, ya sea para laminado o forjado. El Nitruro de titanio (TiN) tiene una solubilidad baja, ya sea como un nitruro o carburo, y es generalmente ineficaz como endurecedor por precipitación en aceros de altocarbono. El carbonitruro de niobio [Nb (C, N)] también tiene una solubilidad menor que vanadio, los niveles altos de carbono en estos aceros reducen la solubilidad de Nb aún más.

V (C, N) se disuelve fácilmente en aceros de alto carbono, y es menos sensible a los niveles de carbono que el de niobio. Las temperaturas de recalentamiento normales (1150°C a 1250°C) son suficientes para disolver todos los carbo-nitruros de vanadio sobre toda la composición, como resultado, el fortalecimiento de vanadio es proporcional a la cantidad agregada de este.

El vanadio tiene una preferencia natural por el nitrógeno, cuando el nitrógeno está disponible debido a esta preferencia, el nitrógeno mejora su rendimiento en los aceros al vanadio, como resultado, el nitrógeno ya no es una solución sólida ahora puede contribuir en la fragilidad del material. El vanadio transforma el nitrógeno de un elemento residual no deseado a una parte integral en la aleación.

El vanadio es una excelente alternativa como un refinador de grano para los productos sometidos a tratamiento térmico. Este elemento ha sido ampliamente utilizado en aceros para forja 38MnVS, mejorando las propiedades mecánicas lo cual es atribuido a la presencia de finos precipitados de V(CN) que refuerzan la matriz así como a la microestructura de la matriz que consiste en una mezcla mucho más fina de ferrita y perlita [18,19].

3.8 Efecto de los elementos nocivos (P, S, O, N, H)

Fósforo. El fósforo esta comúnmente presente en el acero. Pequeñas cantidades permanecen en solución sólida, pero grandes cantidades forman un constituyente por separado, la esteadita, un fosfuro de hierro duro y frágil

Azufre. El azufre es un elemento dañino en el acero, esto es debido a la formación de inclusiones en forma de sulfuros alargados. Si en el material no existe la presencia de

manganeso se forma el sulfuro de hierro, el cual forma un eutéctico de bajo punto de fusión que tiende a concentrarse en las fronteras de grano. El tamaño y la forma de estas inclusiones tienen un fuerte impacto sobre las propiedades mecánicas [20].

Oxígeno. El oxígeno es un elemento indeseable en el acero, su solubilidad incrementa con la disminución del contenido de carbono y su solubilidad disminuye conforme el metal disminuye su temperatura para dar lugar a la solidificación, por lo tanto, el oxígeno es expulsado pasando a su forma molecular, dando lugar a porosidades.

Nitrógeno. El nitrógeno es soluble en el acero fundido, es un potente estabilizador de la austenita.

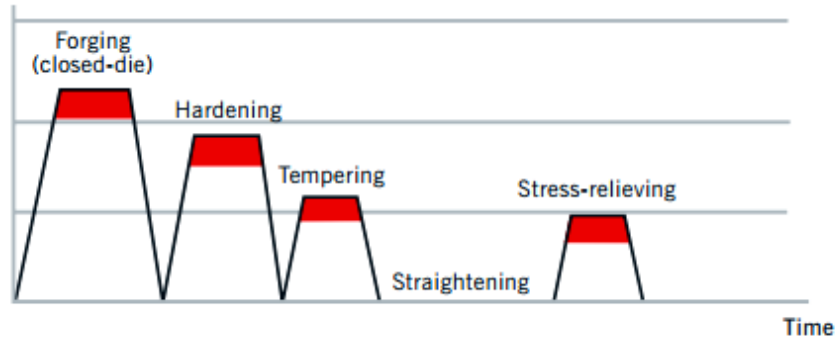
Hidrógeno. El hidrógeno es reconocido como un potente promotor de carburos, normalmente es un elemento indeseable.

3.9 Aceros microaleados para forja

Aceros para forja. Los aceros microaleados al vanadio representan un reemplazo rentable en los grados de tratamiento por temple y revenido. Las propiedades de resistencia de estos grados se derivan de la precipitación de V (C, N) durante el enfriamiento desde la temperatura de forja. El logro de las propiedades finales de resistencia en la condición de forja elimina el costo de los tratamientos térmicos adicionales.

QUENCHED AND TEMPERED STEELS

Temperature



AFP / MICROALLOYED STEELS

Temperature

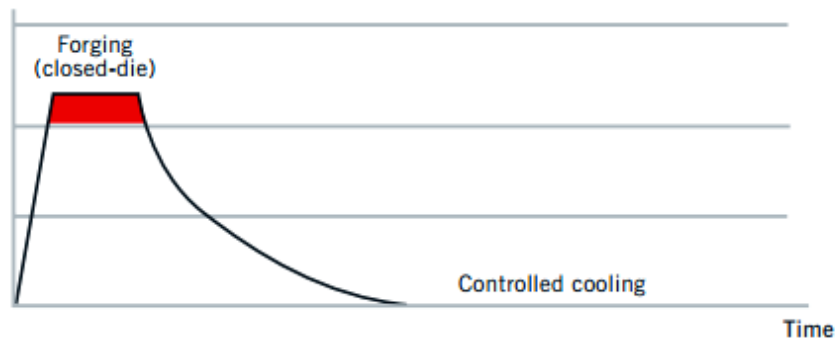


Figura 3.10. Comparativa sobre el proceso de enfriamiento después de la forja en caliente entre aceros convencionales y aceros microaleados.

Los aceros par forja de medio carbono microaleados con vanadio mejorado por niveles apropiados de manganeso, silicio, cromo, nitrógeno y azufre, han reemplazado piezas forjadas templados y revenidos en muchas aplicaciones automotrices. Cigüeñales, bielas, y vigas de eje son piezas que con éxito se están produciendo con estos aceros microaleados [19, 10]. Sus propiedades son comúnmente superiores a las que ofrecen las mismas partes fabricadas de hierros fundidos [22].

Este tipo de aceros presentan excelentes propiedades, como es una elevada resistencia a la fatiga [18], buena conformabilidad, elevada resistencia y buena ductilidad, estas propiedades son función de los parámetros utilizados en su procesamiento, principalmente, su velocidad de enfriamiento [23] y grado de deformación.

Otras variables que afectan fuertemente a este tipo de aceros son la cantidad, tipo y distribución de las inclusiones, se han hecho recientemente esfuerzos para tratar de

caracterizar estas inclusiones, como es el caso del método propuesto por Carl Blais y colaboradores [24]. La técnica se basa en el posicionamiento del haz de electrones producido por el microscopio electrónico de barrido a lo largo de la estructura de cada fase presente en las inclusiones. Se requiere la integración de las señales generadas por el microscopio electrónico de barrido, el espectrómetro de rayos X, y un analizador de imágenes. De acuerdo con resultados de una relación Ca/S de 0.70 en el sulfuro, permite cambiar el factor de forma de las inclusiones de 0.25 a 0.73, la concentración óptima de calcio en el sulfuro es de 15% en peso, la introducción de un porcentaje mayor de calcio no representa cambio alguno en la forma de las inclusiones.

Recientemente se han utilizado elementos para modificar este tipo de inclusiones, tal es el caso del lantano, Warren M. Garrison Jr [17] adicionaron lantano para tratar de para mejorar la tenacidad de fractura en un acero HY180, en este caso ellos determinaron que la adición de 0.015% en peso de lantano mejora la tenacidad de fractura debido a que incrementa el espaciamiento entre las inclusiones. Así mismo, la adición de 0.06% de lantano produjo un incremento en la fracción de volumen de inclusiones lo cual se vio reflejado en una disminución de la tenacidad de fractura.

En este mismo acero pero en otro trabajo de investigación Maloney y colaboradores [25], determinaron el efecto del tipo de sulfuros en el comportamiento en la tenacidad de fractura, la adición de pequeñas cantidades de lantano produce inclusiones del tipo $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$. Estas inclusiones son más grandes y se presentan en forma más espaciada en comparación con las inclusiones de MnS , lo que incrementa notablemente la tenacidad de fractura, la adición de pequeñas cantidades de titanio al final del proceso de fusión produce la modificación de las inclusiones a Ti_2CS . Este tipo de inclusiones son más resistentes a evitar la nucleación, la presencia de este tipo de inclusiones produce aún mayores valores de tenacidad comparado con los dos anteriores.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Fabricación de material

La fabricación del material se realizó en el laboratorio de fundición del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La fusión del material se realizó en un horno de inducción con capacidad para 30 kilogramos (**Figura 4.1**).



Figura 4.1. Horno de inducción con capacidad de 30 kg, utilizado para la fusión de las aleaciones de hierro.

Se utilizaron materiales de alta pureza, así como arrabio y chatarra de acero de composición conocida, para obtener 6 coladas de 30 kg y 6 coladas de 10 kilogramos. Como aleación base se utilizó un acero microaleado de composición comercial, con 0.38%C, 0.50%Si y 1.30%Mn, al cual se le realizaron adiciones de vanadio de 0.11% en peso. A partir de esta composición se realizaron diferentes coladas donde se variaron ligeramente los contenidos de estos elementos, además se realizaron adiciones de tierras raras. La adición de tierras

raras fue de 1.59 gramos por cada kilo de metal de la aleación conocida comercialmente como Michmetal.

4.1.1 Construcción del molde cilíndrico y cuchara

Se utilizaron 2 tipos de moldes, ambos fueron moldes metálicos conocidos como lingoteras. Para la fundición del acero de medio carbono microaleado con vanadio, se diseñaron y fabricaron lingoteras metálicas, **Figura 4.2**, con dimensiones de 5 cm X 5 cm X 25 cm con solera de 5 cm de ancho (1/2") y 6.25 mm de espesor (1/4"). El objetivo de utilizar un molde metálico es del lograr una solidificación rápida del metal líquido y evitar la segregación de elementos aleantes que pueden reducir las propiedades mecánicas de tenacidad y fatiga al no tener una microestructura homogénea.

Los moldes metálicos o lingoteras fueron unidas con soldadura eléctrica de arco manual utilizando electrodo revestido (6013). Para el armado de las lingoteras solo se colocaron puntos de unión para su fácil remoción una vez colado el acero. Aunado a esto, se fabricó una "cucharilla metálica", (**Figura 4.3**), para obtener material que servirá para realizar el análisis de la composición química. Para la fabricación de las "cucharilla metálicas" se utilizó tubo de 3.7 cm de diámetro (1.5") X 4 cm de largo al cual se le soldó un tramo de redondo de 6.25 mm (1/4") X 45 cm de largo para utilizarlo como mango de la "cucharilla metálica". A la cucharilla se le soldó una tapa en la parte inferior de solera de 6.25 mm (1/4") de espesor X 4 cm X 4 cm. De igual forma, solo se le colocaron dos puntos de soldadura para facilitar el desmódelo del material.

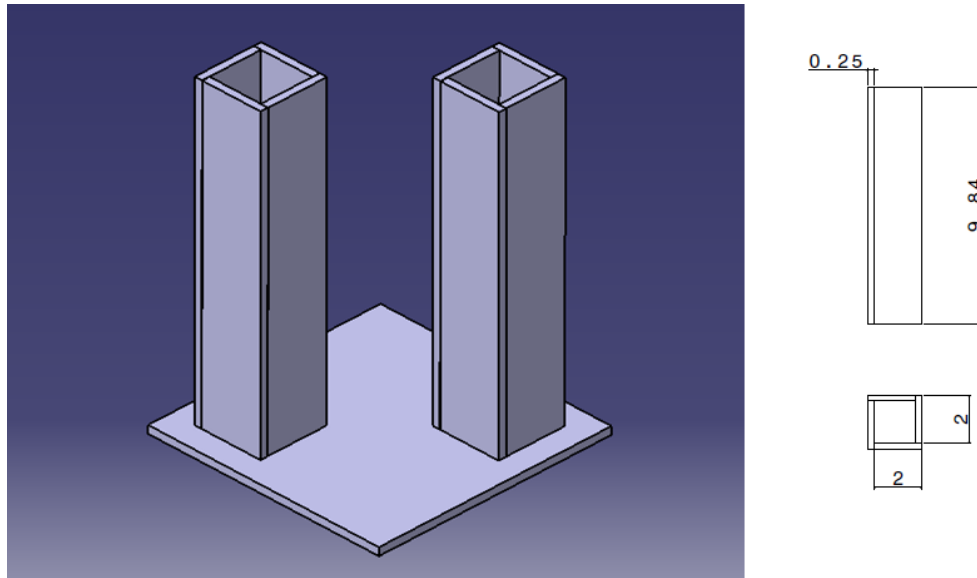


Figura 4.2. Diseño de la lingotera metálica.



Figura 4.3. Cucharilla metálica.

Una vez fabricadas las lingoteras y previo a la fundición, se cubren en su sección superior con colcha cerámica refractaria (**Figura 4.4**), para reducir la velocidad de enfriamiento y evitar el “rechupe” que ocurre en el material colado durante la solidificación direccional.



Figura 4.4. Colcha cerámica refractaria colocada en la parte superior de las lingoteras.

Por otra parte, el molde cilíndrico se fabricó a partir de tubo de acero que fue partido en dos de forma longitudinal, este molde tiene capacidad para 30 kg de acero y les fueron soldadas bisagras para facilitar la extracción del metal, ver **Figura 4.5.**



Figura 4.5. Estructura del molde cilíndrico con bisagras.

4.1.2 Preparación del material y Colada

Para la fabricación del material se realizó el cálculo de la carga a partir de las composiciones conocidas de la palanquilla de acero (**Figura 4.6**) y arrabio utilizados como materiales base, los elementos aleantes considerados para el cálculo de la carga de acuerdo con la composición requerida fueron elementos puros que se adicionaron al metal base ya fundido.



Fig. 4.6. Palanquilla de acero utilizada para la fusión de acero de medio carbono microaleado con vanadio.

Se realizaron un total de 6 fundiciones de acero en base a la siguiente composición química promedio, **Tabla 4.1**, (% peso):

Tabla 4.1. Composición química.

Elemento	%peso (promedio)	%peso (rango)
Carbono	0.38	0.36-0.40
Manganeso	1.37	1.30-1.45
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
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
Tierras Raras	0.04	0.04 -0.06

Para realizar las 6 diferentes fundiciones, primero se determinó el peso total del material a fundir para lo cual se tiene que hacer una estimación en base al número de lingotes como se muestra enseguida:

- a) 20 kg de acero para 4 lingoteras rectangulares.
- b) 60 kg de acero para 2 la lingoteras tubulares de cada composición.

Los cálculos de carga para cada una de las coladas se muestran a continuación:

Para calcular la cantidad de ferroaleaciones se utilizó la siguiente relación (**Formula 4.1**):

$$C = \left(\frac{\%Ef - \%Ei}{\%Efea \times \%ae} \right) \times 100 \quad \text{Formula 4.1}$$

Donde:

C = Cantidad de ferroaleaciones en kg.

%Ef = porcentaje del contenido del elemento en el acero a obtener.

%Ei = porcentaje del contenido del elemento en la chatarra.

%Efea = porcentaje del contenido del elemento en la ferroaleación.

%ae = porcentaje de aprovechamiento o fijación del elemento en el acero fundido.

La medición de la temperatura se realizó mediante un pirómetro de contacto tipo lanza además de un pirómetro laser como referencia.

Los elementos microalentes se adicionaron poco antes de realizar el vaciado del metal, esto con la finalidad de evitar pérdidas por oxidación.

El vaciado se realizó alrededor de 1700⁰C grados centígrados, durante el vaciado se tomaron muestras chill o de solidificación rápida en cucharillas de acero para análisis químico.

El material se cortó para ser pesado y obtener la cantidad estimada de acuerdo a nuestro balance de carga para cada una de las fundiciones a realizar (**Figura 4.7**).



Figura 4.7. Corte de palanquilla tipo chatarra.

Antes de realizar la fundición, la palanquilla de acero y los elementos aleantes se limpiaron con carda de cerdas de acero y cepillo metálico para eliminar la oxidación, grasas, polvo etc., que contaminen el material a fabricar y tengan un efecto negativo sobre la composición química final, **Figura 4.8**.



Figura 4.8. Limpieza de Sorel (arrabio) con cepillo de alambre.

4.1.3 Solidificación

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



Figura 4.9. Solidificación del metal en lingotera metálica.

Se realizaron diferentes pruebas con la finalidad de reducir el rechupe que se forma en la última parte en solidificar, por lo que además de la mazarota de arena sílice endurecida también se utilizó colcha refractaria.

De cada una de las coladas 2 lingoteras rectangulares fueron solidificadas con colcha refractaria y 2 sin colcha refractaria. De las lingoteras cilíndricas una fue solidificada con mazarota de arena sílice y la otra con colcha refractaria.

Así mismo se hicieron pruebas con diferentes espesores de placa en la base de la lingotera, en algunos casos se cubrió esta placa con arena.

4.1.4 Des-moldeo

El proceso de desmoldeo se llevó a cabo después de que el material había enfriado por completo hasta temperatura ambiente, el proceso fue distinto dependiendo del tipo de lingotera, en el caso de las lingoteras cilíndricas con bisagras el proceso fue más sencillo y estas pudieron ser reutilizadas, en el caso de las lingoteras rectangulares hubo que destruirlas para poder extraer el lingote.

4.2 Procesamiento del material

4.2.1 Maquinado de lingotes

Una vez 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 centímetros de diámetro y 40 centímetros de longitud.

4.2.2 Forja de cigüeñales

EL proceso de forja se llevó a cabo dentro de la empresa PEMSA, cada uno de los lingotes fue primeramente homogenizado a 1200⁰C por 15 minutos y posteriormente forjadas con prensas hidráulicas hasta obtener su forma definitiva.

4.2.3 Obtención de probetas

Las probetas para ensayos mecánicos y caracterización metalográficas se obtuvieron de cortes realizados a los cigüeñales forjados. Las muestras fueron obtenidas de la parte de la muñequilla, la **Figura 4.10** muestra la forma en que se realizó el seccionamiento.

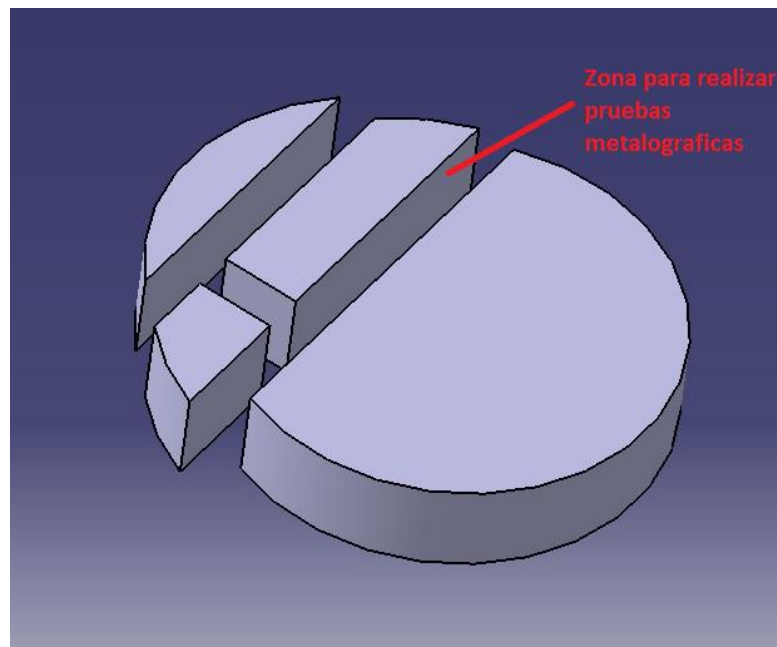


Figura 4.10. Imagen esquemática del seccionamiento para obtención de probetas.

Se obtuvieron 5 probetas, de cada composición química para evaluar la reproducibilidad de los resultados.

4.3 Ensayos mecánicos y caracterización metalográfica

4.3.1 Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E8 [26], se llevaron a cabo en una máquina universal Zwick Roell la cual se muestra en la **Figura 4.11**, en probetas de tamaño reducido, ver **Figura 4.12**.



Figura 4.11. Máquina universal para ensayos mecánicos.

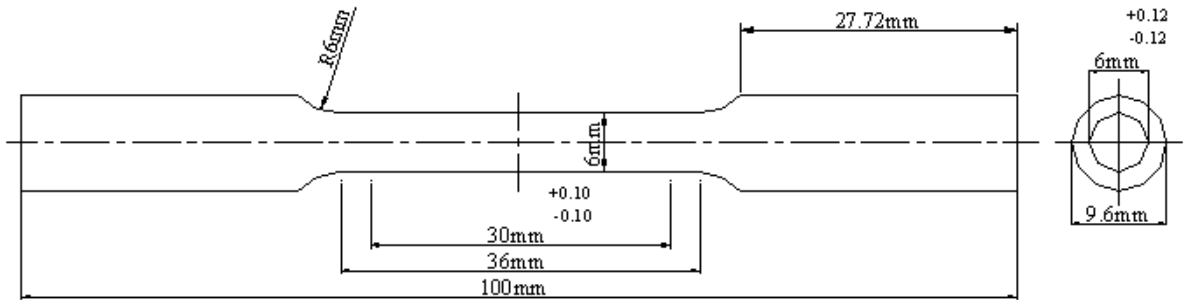


Figura 4.12. Geometría de las probetas para el ensayo de tensión.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y se midió el límite de cedencia, resistencia máxima y porcentaje de elongación.

4.3.2 Dureza

Los ensayos de dureza se realizaron en un durómetro Nexus 30001XL de la marca *Innovatest* con la escala Brinell con 3000 kg de carga por 12 segundos con un indentador con forma de bola de acero de 10 mm de diámetro. Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM E10-15 [27]. Se realizaron un total de 20 indentaciones por muestra en diferentes partes para obtener un promedio para cada composición.

El cálculo de la dureza se realizó de acuerdo con la **Fórmula 4.2**.

$$BHN = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Formula 4.2}$$

Donde:

F= Fuerza aplicada (kgf).

D= Diámetro del indentador.

d= Diámetro de la indentación.

Para el ensayo de dureza fueron seleccionados los 6 cigueñales forjados, 4 cigueñales comerciales forjados (dos del modelo 1 y dos del modelo 2) y dos del material con 0.11% de vanadio y Tierras Raras (TR)

Se realizaron 3 indentaciones en el plato **Figura 4.13** y 5 indentaciones en el núcleo **Figura 4.14**.



Figura 4.13. Indentaciones en el plato.



Figura 4.14. Indentaciones en el Núcleo.



Figura 4.15. Esquema de cortes de cigüeñal.

4.3.3 Análisis metalográfico

La preparación metalográfica se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM E3 – 11 [28].

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, 150, 240, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000. Posteriormente las muestras se sometieron a un pulido utilizando un paño de nylon y pasta de diamante de $6\mu\text{m}$ como abrasivo y lubricante en una pulidora metalográfica. Finalmente se procedió a un pulido más fino con pasta de diamante de $1\mu\text{m}$.

Después del pulido las muestras fueron atacadas con una solución reactiva conocida como Nital diluida en etanol al 3% por un tiempo de 15 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 MA100 el cual se muestra en la **Figura 4.16**. Las micrografías fueron tomadas a 100 magnificaciones.



Figura 4.16. Microscopio óptico metalúrgico.

Se analizaron 20 fotografías por muestra de secciones aleatorias del material. Las micrografías se analizaron mediante el software *AxioVision* para determinar el volumen de ferrita y perlita. La medición del tamaño de grano se realizó con el uso del mismo software por comparación con el estándar de la ASTM E112-96 [29] y ASTM E1382-97 [30].

La prueba de tamaño de grano se obtiene por el método comparativo de acuerdo a la norma ASTM, tomando de referencia los límites de granos perlíticos en 4 puntos diferentes (**Figura 4.17a**) en superficie, a 6 mm de la superficie, a 12 mm de la superficie y el núcleo de la muñequilla, la descarburación se obtiene sobre la superficie (**Figura 4.17 b**) y la cuantificación de fases (Perlita-Ferrita) a 6 mm después de la superficie (**Figura 4.17c**).



Figura 4.17. a) Zonas para la obtención de la prueba de tamaño de grano, b) Zona para la prueba de descarburación y c) Zona para la cuantificación de fases.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Fundición

Los resultados de los balances de carga para cada una de las 6 coladas se muestran a continuación, los cálculos están realizados tomando como base coladas de 5 kg para cada una de las lingoteras, para las coladas de 30 kilogramos únicamente se multiplicaron las cantidades.

**Tabla 5.1. Composición
0% V.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	0

**Tabla 5.2. Composición
0.05% V.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	3.38

**Tabla 5.3. Composición
0.09% V.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	6.089

**Tabla 5.4. Composición
0.11% V.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	7.43

**Tabla 5.5. Composición
0.09% V Con TR.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	6.089
Tierras raras	1.59

**Tabla 5.6. Composición
0.11% V Con TR.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	7.43
Tierras raras	1.59

Para hacer la fundición del acero de medio carbono microaleado con vanadio, se utilizaron dos hornos eléctricos de inducción, uno de 30 y otro de 250 kilos. Los hornos fueron operados a entre 30 y 33 Kilowatts. El tiempo aproximado de fusión por colada fue de 50 min.

La fusión de los aceros se inicia con la colocación de la mayor cantidad de palanquilla de acero en el crisol del horno **Figura 5.1**. Se eleva la potencia del horno hasta 34 Kilowatts para alcanzar la temperatura de fusión de 1720°C. Una vez en estado líquido el material, se le agrega escoriador (400 grs.) para eliminar el exceso de óxido en forma de escoria y no introducir oxígeno debido a que puede formar compuestos que fragilizan el acero **Figura 5.2**. El metal líquido debe ser constantemente agitado para evitar que se solidifique en su parte superior y retrase la fusión. La temperatura se monitorea mediante un termopar de inmersión. En estado líquido, se le agrega material soret para ajustar el contenido de carbono.



Figura 5.1. Palanquilla dentro del crisol.



Figura 5.2. Adición de escoriador.

Una vez disuelto el soret se adicionan los elementos aleantes (**Figura 5.3**) en el siguiente orden:

1. Silicio (Si)
2. Níquel (Ni)
3. Manganeso (Mn)
4. Cobre (Cu)
5. Cromo (Cr)
6. Vanadio (V)

7. Tierras raras



Figura 5.3. Adición de los elementos aleantes.

Para las fundiciones con tierras raras, este se adiciona por medio de una lanza encapsulada (**Figura 5.4**) teniendo mucha precaución ya que las tierras raras reaccionan de forma explosiva (**Figura 5.5**).



Figura 5.4. Tierras raras encapsuladas.



Figura 5.5 Reacción de las tierras raras.

Una vez que se adicionaron todos los elementos aleantes y se han disuelto en el metal líquido hasta lograr una mezcla homogénea (no se deben observar trozos de aleante flotando), se procede al vaciado del metal líquido en la lingotera, esto se hace de forma manual con un maneral de acero, **Figura 5.6**. Una vez llena la lingotera con el metal líquido, se le debe colocar arena sílica en la parte superior para reducir la velocidad de enfriamiento y solidificación para reducir el rechufe y obtener un lingote sano, **Figura 5.7** y **5.8**.



Figura 5.6. Vaciado del metal en lingoteras.



Figura 5.7. Lingotera metálica con colcha refractaria justo después del vaciado.

Una vez solidificado y enfriado, se remueven los puntos de soldadura de las lingoteras para el extraer el lingote y proceder a cortar muestras para probetas de ensayos mecánicos y de metalografía.

De forma similar se extraen las muestras obtenidas para realizar el análisis químico, **Figura 5.9.**



Figura 5.8. Enfriamiento de los lingotes.



Figura 5.9. Material para análisis químico.

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 rechupe, así mismo, la parte superior de la mazarota fue cubierta con arena para disminuir las pérdidas de calor y tratar de direccionar

la solidificación. Sin embargo, en las pruebas realizadas donde se colocó en la parte superior de la lingotera la colcha refractaria de fibra cerámica se obtuvieron mejores resultados y una notable disminución del rechupe.

En la **Figura 5.10** se muestra el lingote solidificado, la colcha cerámica ha sido removida ligeramente y se puede observar que la parte superior se encuentra a una mayor temperatura, al ser esta parte la última en solidificarse se tiene una reducción en el rechupe lo que permite un mayor aprovechamiento del material.



Figura 5.10. Lingote solidificado donde se observa el gradiente de temperatura debido a la presencia de la colcha cerámica en la parte superior.

En la **Figura 5.11**, se observa la disminución de, rechupe en la parte superior de lingote gracias a la presencia de la colcha cerámica.



Figura 5.11. Lingote solidificado.

Las **Figuras 5.12** y **5.13** muestran una la serie de lingotes obtenidos para el posterior análisis, estos lingotes fueron utilizados principalmente para obtener probetas para los diferentes ensayos mecánicos ya que al ser de la misma composición que los lingotes cilíndricos pueden correlacionarse sus propiedades.



Figura 5.12. Lingotes colados que se utilizaran para obtener probetas para los diferentes ensayos mecánicos y metalográficos.



Figura 5.13. Lingotes colados que se utilizaran para obtener probetas para los diferentes ensayos mecánicos y metalográficos.

5.1.1 Defectos de fundición

De los lingotes obtenidos se identificaron diferentes tipos de defectos, como fue el caso de la presencia del rechupe, el cual disminuyó con la ayuda de la colcha cerámica, en la **Figura 5.14** se muestra el rechupe formado en la parte superior del lingote que fue vaciado

en lingotera a) con mazarota y b) con colcha cerámica, como se observa, existe una notable disminución en la profundidad del rechupe en la figura 5.14 b.



Figura 5.14. Imágenes comparativas de 2 lingotes cortados a la misma distancia donde se observa la diferencia en profundidad del rechupe.

Otro de los defectos presentes fue la porosidad, esta se manifestó debido a la presencia de una alta concentración de humedad y elementos contaminantes en la base de la lingotera metálica.



Figura 5.15. Macroporosidad debido a contaminación y humedad.

Este efecto negativo fue evitado con un calentamiento previo y una limpieza exhaustiva del molde, además se de la aplicación de una capa de pintura refractaria de zirconia.

Después de haber implementado las mejoras antes mencionadas se pudieron obtener los diferentes lingotes completamente sanos para ser entregados a la empresa para que se realizaran las pruebas de forja correspondientes y validar la aplicación de estas aleaciones para la fabricación de cigüeñales.

5.2 Forja del cigüeñal

Los lingotes seleccionados para el proceso de forja fueron dos:

Dos lingotes con 0.11% de vanadio y adiciones de Tierras Raras (TR). (Modelo 1 y Modelo 2).

**Tabla 5.7. Composición
0.11% V con TR 1.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	7.43
Tierras Raras	1.59

**Tabla 5.8. Composición
0.11% V Con TR 2.**

Elemento	Gramos (g)
Acero	4581.72
Sorel	268.28
Manganeso	31.26
Silicio	18.75
Cobre	12.5
Cromo	5
Níquel	7.5
Vanadio	7.43
Tierras raras	1.59

NOTA: El proceso de forja no se presenta de una forma detallada debido a que por razones propias de la empresa no se puede difundir el procedimiento, sin embargo los cigüeñales fueron forjados satisfactoriamente, las propiedades mecánicas y su caracterización metalográfica se muestran en la siguiente sección.



Figura 5.16 a. Cigüeñales forjados con el acero experimental.



Figura 5.16 b. Cigüeñales forjados en la empresa PEMSA con el acero experimental.

5.3 Caracterización metalográfica y Ensayos mecánicos

Los resultados de la caracterización metalográfica que se realizó a los materiales que fueron seleccionados para forja se muestran a continuación.

La **Tabla 5.9** muestra los resultados comparativos sobre el tamaño de grano obtenido en cada uno de los diferentes materiales y sus correspondientes zonas. Así mismo las metalografías y las mediciones del tamaño de grano se muestran en la **Figura 5.17**.

Tabla 5.9. Tabla comparativa del tamaño de grano.

Muestra	Tamaño de grano en las zonas determinadas			
	Superficie	6 mm	12 mm	Núcleo
Modelo1_M1	6	5.5	5	5
Modelo1_M2	6.5	5.5	5	5
Modelo2_M1	6	5	5	5
Modelo2_M2	6	5.5	5	4.5
V 0.11%+ TR 1	5	4	3.5	3
V 0.11%+TR 2	4	3.5	3	3

Dónde: M1=Muestra 1, M2= Muestra 2

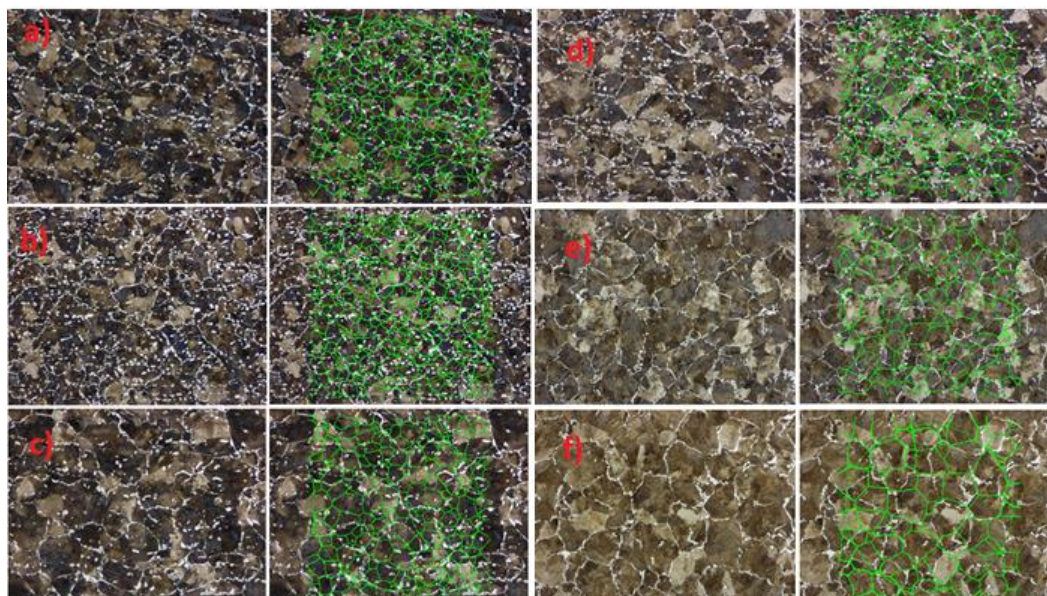


Figura 5.17. Metalografía y tamaño de grano por método comparativo ASTM a 6mm de la superficie, a) Modelo 1 muestra 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+Tierras Raras muestra 1, y f) V 0.11+TR muestra 2.

De las **Tabla 5.9** podemos observar que el número de tamaño de grano es menor en las muestras con adición de TR lo cual también se observa claramente en las micrografías de la **Figura 5.17**, por lo tanto el tamaño de grano incrementa debido a la adición de TR. Cabe resaltar la diferencia entre Número de Tamaño de Grano y tamaño de grano, cuanto mayor es el número ASTM, menor es el tamaño de los granos.

Se realiza una medición de la profundidad de descarburación con el microscopio desde la superficie como se muestra en la figura 3b, los resultados obtenidos en la prueba son los siguientes (**Tabla 5.10**).

Tabla 5.10. Resultado de Descarburación.

Muestra	Distancia (mm)
Modelo1_M1	0.15
Modelo1_M2	0.17
Modelo2_M1	0.15
Modelo2_M2	0.14
V 0.11%+Tierras 1	0.07
V 0.11%+Tierras 2	0.09

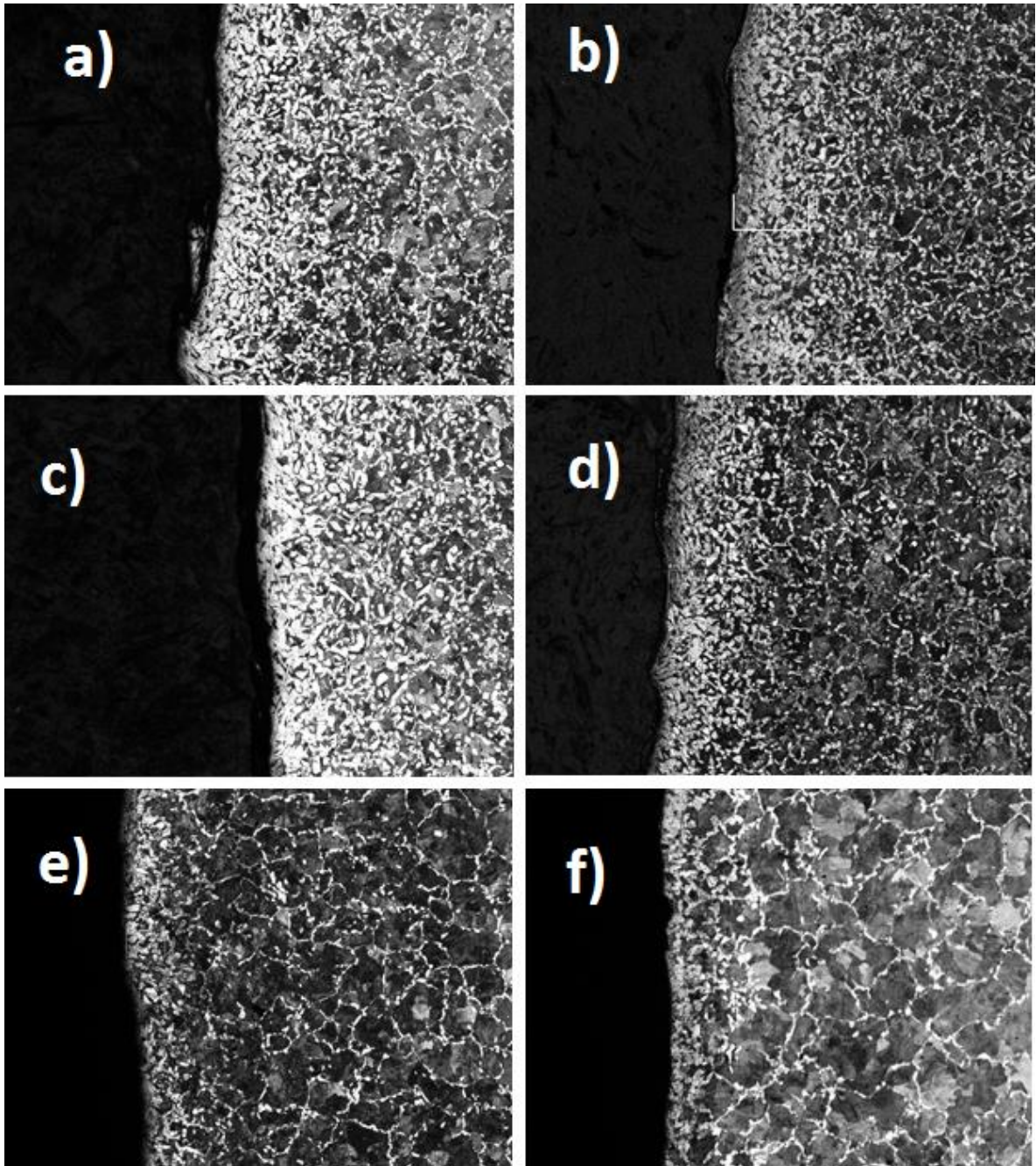


Figura 5.18. Micrografías de la superficie decarburada, a) Modelo 1 muestra1 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+ TR 1, y f) V 0.11+Tierras Raras 2.

Las micrografías para las mediciones de la cuantificación de fases se muestran en la **Figura 5.19**.

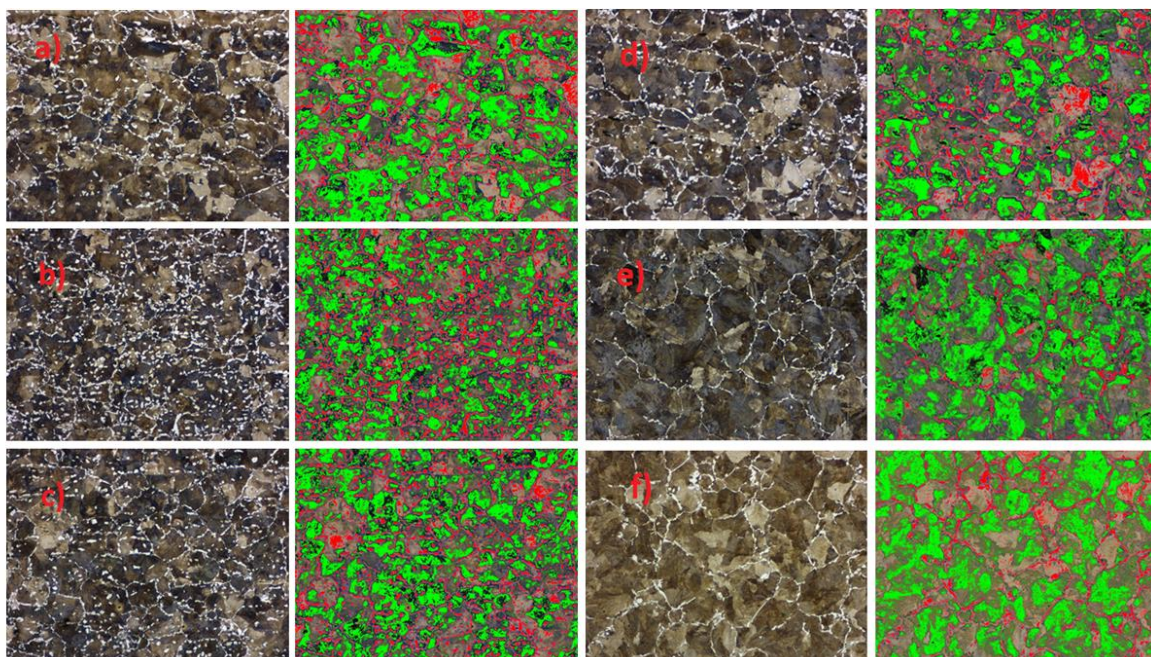


Figura 5.19. Micrografías utilizadas para la cuantificación de fases a 6 mm de superficie, a) Modelo 1 muestra1 1, b) Modelo 1 muestra 2, c) Modelo 2 muestra 1, d) Modelo 2 muestra 2, e) V 0.11%+ TR 1, y f) V 0.11+TR 2.

Los resultados de la cuantificación de fases en las muestras a 6 mm de la superficie, se muestran en la siguiente tabla. (Tabla 5.11).

Tabla 5.11. Resultados de la cuantificación de fases.

Muestra	Porcentaje de Ferrita (%)	Porcentaje de Perlita (%)
Modelo1_M1	10.58	89.42
Modelo1_M2	12.74	87.26
Modelo2_M1	10.07	89.93
Modelo2_M2	9.85	90.15
V 0.11%+TR 1	4.57	95.43
V 0.11%+TR. 2	6.42	93.58

En los resultados mostrados en la **Tabla 5.11** podemos observar claramente que el porcentaje de perlita incrementa con la adición de tierras raras, el incremento en volumen de perlita incrementa los valores de dureza del material y disminuye ligeramente el porcentaje de elongación pero incrementa la resistencia máxima del material, estos valores

conducen con los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos que se muestran a continuación.

Los resultados de las pruebas de dureza que se realizaron a los materiales que fueron seleccionados para forja se muestran en las tablas siguientes.

Los valores de dureza obtenidos en el “Plato”, están representadas en las siguientes tablas de acuerdo a cada material.

Donde: M1=Muestra 1, M2= Muestra 2

**Tabla 5.12. Dureza de plato
Modelo1_M1.**

No	Modelo1_M1	
Modelo	1	
Muestra	1	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.655	275
2	3.655	275
3	3.706	268
	Promedio	272.67

**Tabla 5.13. Dureza de plato
Modelo1_M2.**

No	Modelo1_M2	
Modelo	1	
Muestra	2	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.731	264
2	3.63	279
3	3.681	272
	Promedio	271.67

**Tabla 5.14. Dureza de plato
Modelo2_M1.**

No	Modelo2_M1	
Modelo	2	
Muestra	1	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.681	272
2	3.655	275
3	3.731	264
	Promedio	270.33

**Tabla 5.15. Dureza de plato
Modelo2_M2.**

No	Modelo2_M2	
Modelo	2	
Muestra	2	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.706	268
2	3.655	275
3	3.681	272
	Promedio	271.67

Taba 5.16. Dureza de plato TR_M1.

No	M1	
Modelo	1	
Muestra	UNICA	
Material	V 0.11% + TR	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.555	292
2	3.580	288
3	3.529	296
Promedio		292

Taba 5.17. Dureza de plato TR_M2.

No	M2	
Modelo	1	
Muestra	UNICA	
Material	V 0.11% +TR.	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.605	284
2	3.706	268
3	3.605	284
Promedio		278.66

Los valores de dureza del plato mostrados en las tablas anteriores se muestran graficados en la **Figura 5.20**.

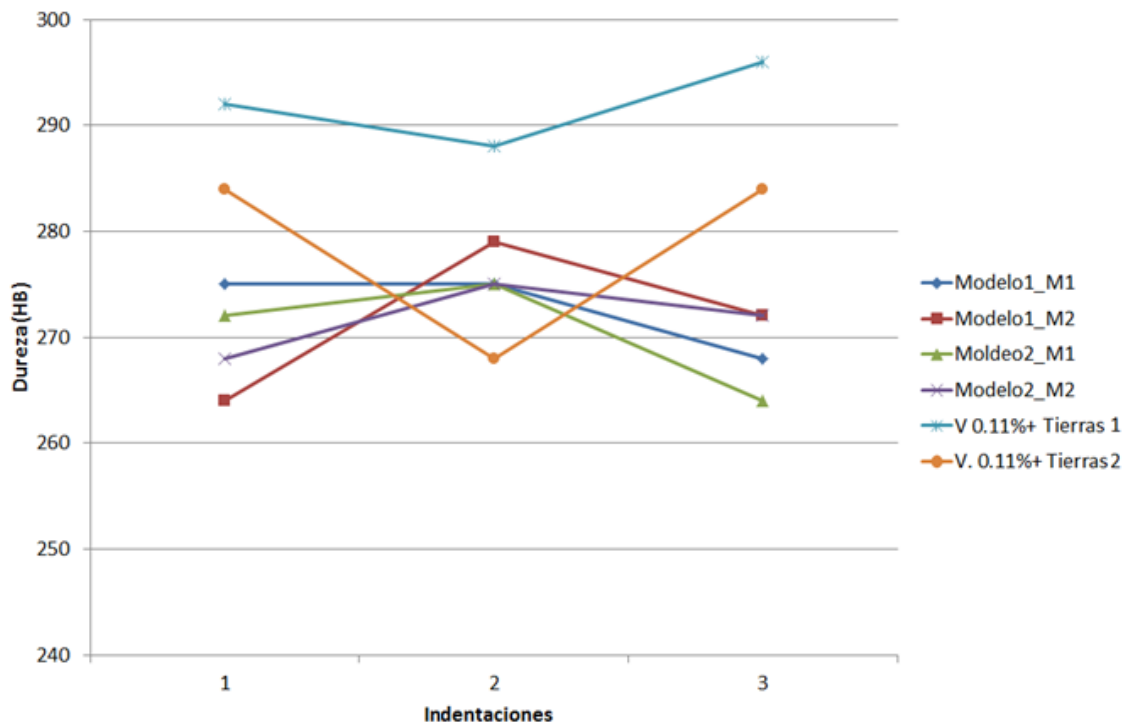


Figura 5.20. Dureza del plato de los diferentes materiales y muestras.

Los valores de dureza obtenidos del “núcleo” se muestran en las siguientes tablas de acuerdo a cada material.

**Tabla 5.18. Dureza de núcleo
Modelo1_M1.**

No	Modelo1_M1	
Modelo	1	
Muestra	1	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.706	268
2	3.706	268
3	3.706	268
4	3.706	268
5	3.706	268
	Promedio	268

**Tabla 5.19. Dureza de núcleo
Modelo1_M2.**

No	Modelo1_M2	
Modelo	1	
Muestra	2	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.731	264
2	3.706	268
3	3.731	264
4	3.756	260
5	3.756	260
	Promedio	263.2

**Tabla 5.20. Dureza de núcleo
Modelo2_M1.**

No	Modelo2_M1	
Modelo	2	
Muestra	1	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.706	268
2	3.706	268
3	3.706	268
4	3.681	272
5	3.706	268
	Promedio	268.8

**Tabla 5.21. Dureza de núcleo
Modelo2_M2.**

No	Modelo2_M2	
Modelo	2	
Muestra	2	
Material	Titular	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.681	272
2	3.706	268
3	3.681	272
4	3.731	264
5	3.731	264
	Promedio	268

Taba 5.22. Dureza de núcleo TR_M1.

No	M1	
Modelo	1	
Muestra	UNICA	
Material	V 0.11% + TR	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.681	272
2	3.655	275
3	3.731	264
4	3.630	279
5	3.681	272
	Promedio	272.4

Taba 5.23. Dureza de núcleo TR_M2.

No	M2	
Modelo	1	
Muestra	UNICA	
Material	V 0.11% + TR	
No.	Diámetro (mm)	HB
1	3.756	260
2	3.756	260
3	3.731	264
4	3.731	264
5	3.731	260
	Promedio	261.6

Los valores de dureza del núcleo mostrados en las tablas anteriores se muestran graficados en la **Figura 5.21**.

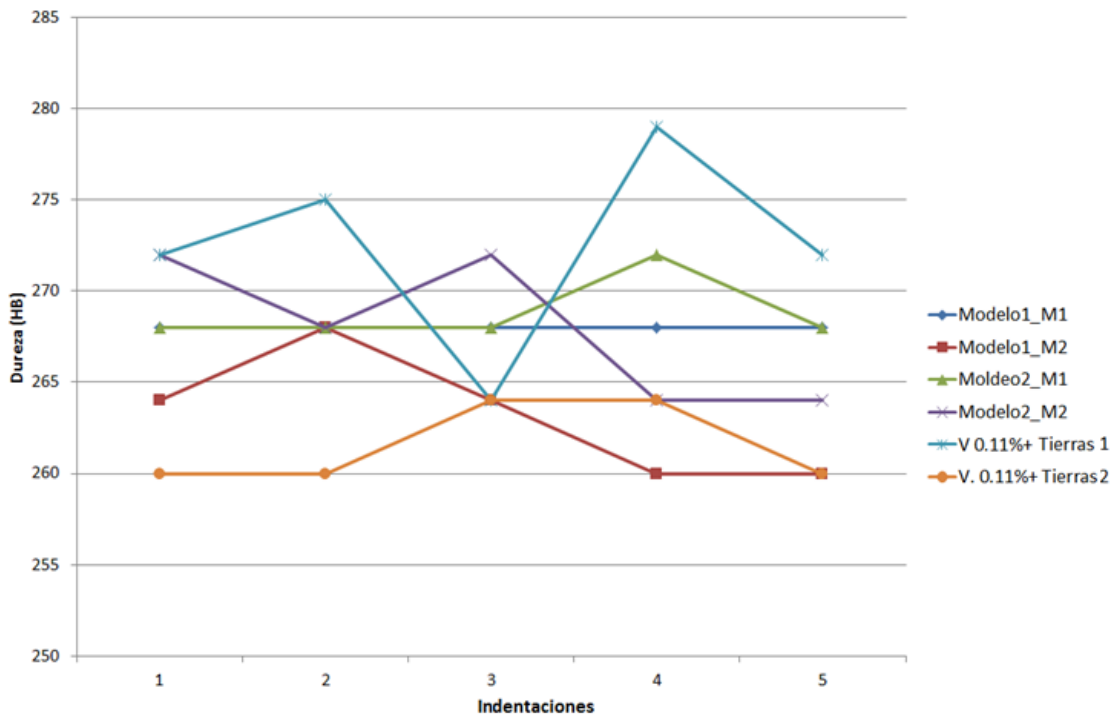


Figura 5.21. Dureza del núcleo de los diferentes materiales y muestras.

Los resultados muestran de manera general que la adición de tierras raras incrementan ligeramente la dureza, tanto del plato como en el núcleo del cigüeñal.

Los resultados de los ensayos de tensión se muestran en la **Tabla 5.24**, (límite de cedencia, resistencia máxima y elongación) y en la gráfica de la **Figura 5.22** se muestran de forma comparativa las curvas Esfuerzo-Deformación de los diversos materiales.

Tabla 5.24. Resultados de los ensayos de tensión.

Muestra	YieldStrength (Mpa)	TensileStrength (Mpa)	Elongación (%)
Modelo1_M1	624.15	897.30	14.67
Modelo1_M2	627.65	901.54	13.85
Modelo2_M1	621.93	893.45	14.39
Modelo2_M2	620.61	893.92	14.11
V 0.11% + TR. 1	633.38	926.71	6.60
V 0.11% + TR. 2	591.54	891.20	6.92

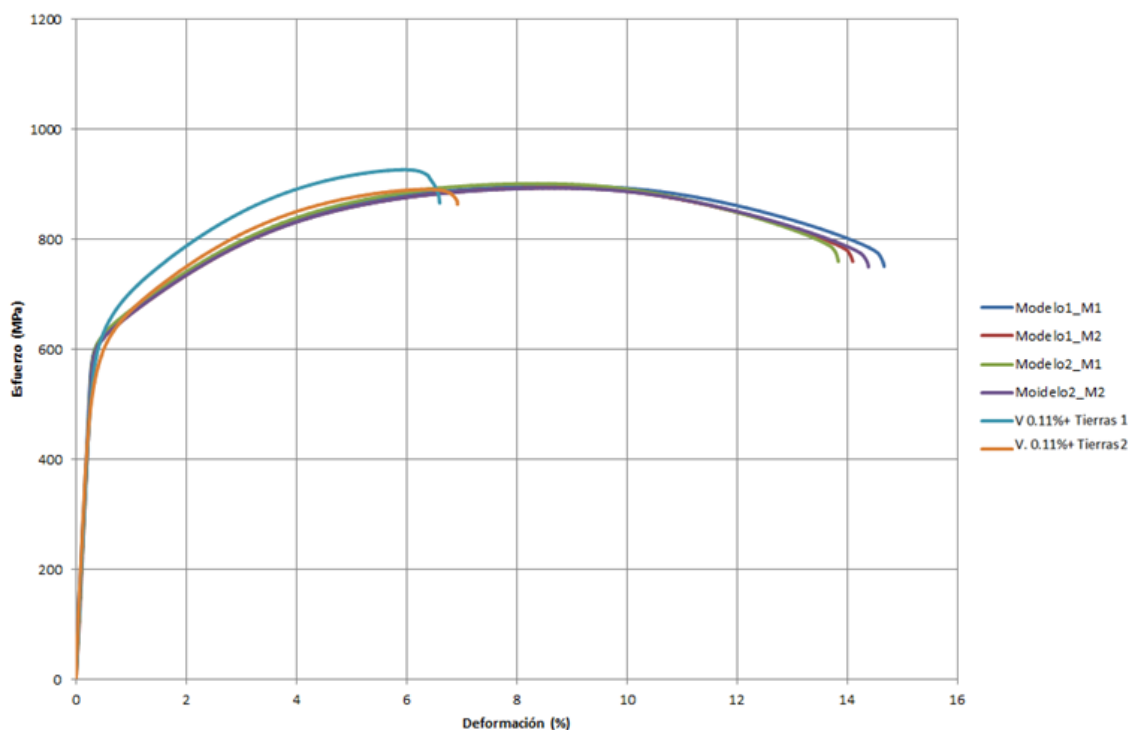


Figura 5.22. Curva esfuerzo deformación de los diversos materiales y muestras.

De los resultados se observa que la adición de tierras raras incrementa la resistencia máxima del material, lo cual concuerda con los valores de dureza antes mostrados, sin embargo este endurecimiento produce una disminución en el porcentaje de elongación, este endurecimiento es atribuido al incremento en volumen de perlita en el material, la cual es una fase más dura que la ferrita. Por lo tanto quedará a criterio de los diseñadores la elección de estos de acuerdo con las necesidades de la pieza.

No se observó que la adición de tierras raras tuviera una influencia notable sobre la modificación de las inclusiones, esto pudo deberse al método utilizado para su inyección en el metal fundido donde debido a la alta temperatura se pierde gran cantidad de los aleantes debido a oxidación ó reacción.

NOTA: Los resultados obtenidos y los ensayos realizados en el microscopio electrónico de barrido, para la caracterización de inclusiones de sulfuro de Manganeso (MnS) y su modificación por la adición de Tierras Raras, no se pueden mostrar en el trabajo presente, ya que esta información es parte confidencial y perteneciente a la empresa Pintura estampado y montaje, S.A.P.I. de C.V (PEMSA) Celaya, Guanajuato,

CONCLUSIONES

- 1.- Se desarrolló el método para fabricar el acero de medio carbono microaleado con vanadio para la elaboración de cigüeñales forjados.
- 2.-Durante el proceso de fundición se determinó que la colcha térmica tiene un mejor resultado para disminuir los defectos de fundición (rechupe), que la mazarota de arena sílice endurecida con silicato de sodio, lo que permite un mayor aprovechamiento del material fabricado.
- 3.- Se demostró que el acero de medio carbono microaleado con vanadio puede ser usado satisfactoriamente para la fabricación de cigüeñales.
- 4.- Las propiedades mecánicas de dureza, límite de cedencia, resistencia máxima y la fase de la microestructura Ferrita-Perlita de los cigüeñales fabricados con el acero experimental (vanadio 0.11% + TR), se asemejan con los resultados obtenidos de los cigüeñales utilizados en motores de alto rendimiento (Modelo1_M1, Modelo1_M2, Modelo2_M1 y Modelo2_M2).
- 5.- El número de tamaño de grano disminuye con la adición de vanadio (0.11%) + TR, por lo tanto se tiene un incremento en el tamaño de los granos.
- 6.- La adición de 0.11% de vanadio + Tierras raras incrementa la resistencia máxima del material, lo cual concuerda con los valores de dureza antes mostrados, sin embargo este endurecimiento produce una disminución en el porcentaje de elongación, este endurecimiento es atribuido al incremento en volumen de perlita en el material.
- 7.- La adición de 0.11% de Vanadio + Tierras raras redujo un 40-50% la descarburación del material producida por el calentamiento previo a la forja.
- 8.- No se observó que la adición de Tierras raras tuviera una influencia notable sobre la modificación de las inclusiones, esto pudo deberse al método utilizado para su inyección en el metal fundido donde debido a la alta temperatura se pierde gran cantidad de los aleantes debido a oxidación o reacción.

RECOMENDACIONES

- 1.- Se recomienda elevar los contenidos de adición de tierras Raras en un 25%.
- 2.- Se recomienda hacer un trabajo combinado de Tierras raras con adición de Calcio (Ca), para modificar las inclusiones de sulfuro de manganeso.
- 3.- Es conveniente realizar fundiciones de este tipo de aceros con adiciones de Ca únicamente.
- 4.- Se recomienda utilizar contenido de manganeso de 1% - 1.3% máx., para aumentar el contenido de Ferrita y mejorar la ductilidad del material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tong-bo ZHANG, Yong SHEN, Pan LIU, Qi-long YONG, Yao-zong BAO, “*New Type Austenite Dynamic Recrystallization of Microalloyed Forging Steels 38MnVS During Forging Process*”, Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, Vol.20 (5), pp. 57–60.
- [2] Pan Liua, Rongpei Liu, Yuansheng Wei, Hongxin Yang, Qilong Yong, Yaozong Bao, “*Austenite dynamic recrystallization of the microalloyed forging steels 38MnVS during forging process*”, Procedia Engineering, Vol 27, 2012, pp. 63–71.
- [3] Groover Mikell P, “*Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, Procesos y Sistemas*”, 3era edición. Mc. Graw Hill., México, 2007, pp 240-248.
- [4] Castro G. “*Fundiciones*”, Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A., Febrero, 2009.
- [5] María Nuria Salán B., “*Tecnología de procesos y transformación de materiales*”. 1 ed. 2005.
- [6] John D. Verhoeven, “*Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist*”. Digital printing, January 2010, ASM International.
- [7] Escuela Colombiana de Ingeniería “*Fundición, Curso de procesos de manufactura*”. Ed. 2008-2, Colombia, 2008.
- [8] Avner, S.H., “*Introducción a la Metalurgia Física*”. 2 edición, Mc. Graw Hill., México, 1974.
- [9] ASM Handbook Volume 14A, “*Metalworking: Bulk Forming, Digital Edition*”, ASM International, EUA, 2013.
- [10] ASM Handbook Volume 1, “*Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Digital Edition*”, ASM International, EUA, 2013.
- [11] C. Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, R. Panelli y J. Petroni, “*Estimación de la composición de las inclusiones y el acero luego del tratamiento con calcio*”, SAM,IV Coloquio latinoamericano de Fractura y Fatiga, pp. 15-21, Agosto, 2000.

- [12] Luka Krajnc, Primo` Mrvar, Jo`ef Medved2, “*Thermodynamic characterization of multiphase non-metallic inclusions in re-sulphurised steel grades*”, Department of Materials and Metallurgy, 2014, pp. 923-929.
- [13] J. Hampl, J. Odehnal, B. Smetana, “*The influence of calcium on technological properties and micropurity of steel castings*”, *Metallurgija* Vol.55, 2015, pp. 297-300.
- [14] K. Tshilombo: “*Determination of inclusions in liquid steel after calcium treatment*”; *International journal of minerals, metallurgy and materials*, Vol. 17, No.1, Feb, 2010, pp28
- [15] Park, J.H., Kim, D.J. & Min, D.J., “*Characterization of nonmetallic inclusions in high-manganese and aluminum-alloyed austenitic steels*”, *Metall and Mat Trans A*, Volume, 2012, pp. 2316–2324.
- [16] M. Lind and L. Holappa: “*Transformation of alumina inclusions by calcium treatment*”; *Metallurgical and materials transactions B*, Vol. 41B, April 2010.
- [17] Warren M. Garrison Jr. and James L. Maloney, “*Lanthanum additions and the toughness of ultra-high strength steels and the determination of appropriate lanthanum additions*”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 403, (1-2), 2005, pp. 299–310.
- [18] Weijun Hui , Yongjian Zhang, Chengwei Shao, Silian Chen, Xiaoli Zhao, Han Dong, “*Microstructural effects on high-cycle fatigue properties of microalloyed medium carbon steel 38MnVS*”, *Materials Science and Engineering A*, 2015, Vol. 60, pp. 147–153.
- [19] Weijun Hui , Silian Chen, Yongjian Zhang, Chengwei Shao, Han Dong, “*Effect of vanadium on the high-cycle fatigue fracture properties of medium-carbon microalloyed steel for fracture splitting connecting rod*”, *Materials & Design*, 2015, vol. 66 (A), pp. 227–234.
- [20] Dennis W. Hetzner, “*Sulfur content, inclusion chemistry, and inclusion size distribution in calcium treated 4140 steel*”, *Proceedings of a Symposium held in conjunction with the World Materials Congress*, ASM International, 1988, pp.35-48.
- [21] Wei Li, Qing Yan, Jianhua Xue, “*Analysis of a crankshaft fatigue failure*”, *Engineering Failure Analysis*, 2015, vol. 55, pp.139-147.
- [22] Florian Summer, Florian Grün, Jürgen Schiffer, István Gódor, Ilias Papadimitriou, “*Tribological study of crankshaft bearing systems: Comparison of forged steel and cast iron counterparts under start–stop operation*”, *WEAR*, 2015, vol. 338-339, pp. 232–241.

- [23] AhmetKaynar, SüleymanGündüz, Mustafa Türkmen. “*Investigation on the behaviour of medium carbon and vanadium microalloyed steels by hot forging test*”.*Materials and Design* 51 (2013) 819–825.
- [24] Carl Blais, Gilles L'Espérance, Hoang LeHuy, Clément Forget, “*Development of an Integrated Method for Fully Characterizing Multiphase Inclusions and Its Application to Calcium-Treated Steels*”, *Materials Characterization* 38, 1997, pp. 25-37.
- [25] James L. Maloney and Warren M. Garrison Jr. , “*The effect of sulfide type on the fracture behavior of HY180 steel*”, *Acta Materialia*, Vol. 53 (2), 2005, pp. 533–551.
- [26] Annual book of ASTM standards, “*Standard Test Method for Tensile Testing of Metallic Materials*”, ASTM, Vol. 03.01, 2009, pp. 542-566.
- [27] Annual book of ASTM standards, “*Test method for Brinell hardness of metallic materials*”, ASTM, E 10, vol. 03.02. Philadelphia: 2012.
- [28] Annual book of ASTM standards, “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”, ASTM, d E3, ASTM International, 2011, West Conshohocken, USA. pp. 1-13.
- [29] Annual book of ASTM standards, “*Standard test methods for determining average grain size*”, ASTM, 03.01, 2002, pp. 251-274.
- [30] Annual book of ASTM , “*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis*”, ASTM, 03.01, 2002, pp. 909-930.

APÉNDICE A

Carl Zeiss Microscopy GmbH

Project Modelo1_Muestra1

Date 8/26/2015

Project summary:

General:

Project No: InputImage1_A00915.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 8/26/2015
Evaluated by:
Material: Modelo 1
Sample No: Modelo1_M1
No of images: 4
Mean Grain Size Number: 5.38

Order:

Order No:
Description: Modelo1_Muestra1, Tamaño de grano de superficie Imagen1), 6mm (Imagen2), 12mm (Imagen 3)y núcleo (Imagen4).

Comment:

Checked by:

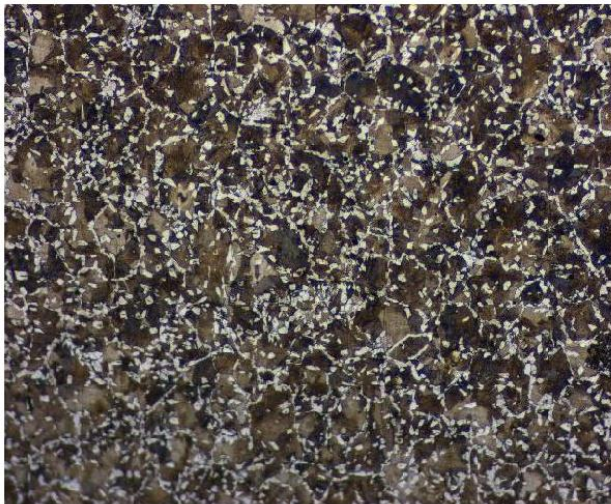
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 6.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

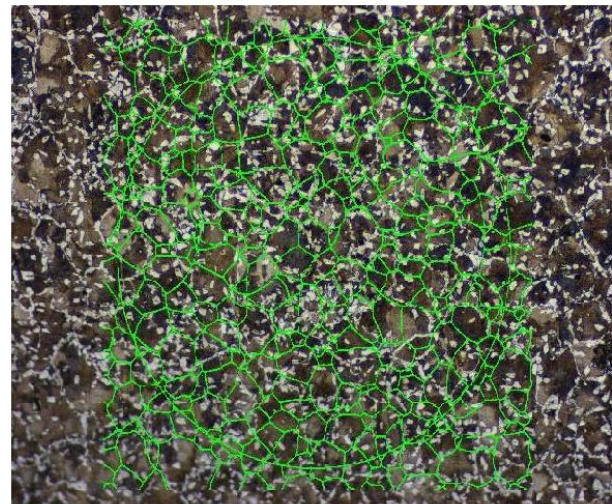
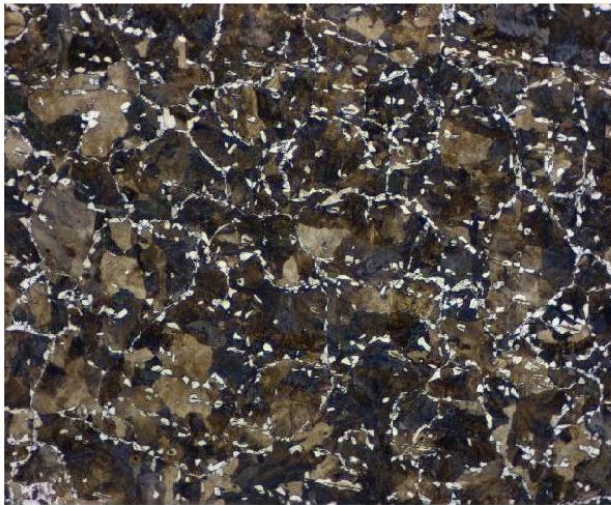


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 5.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

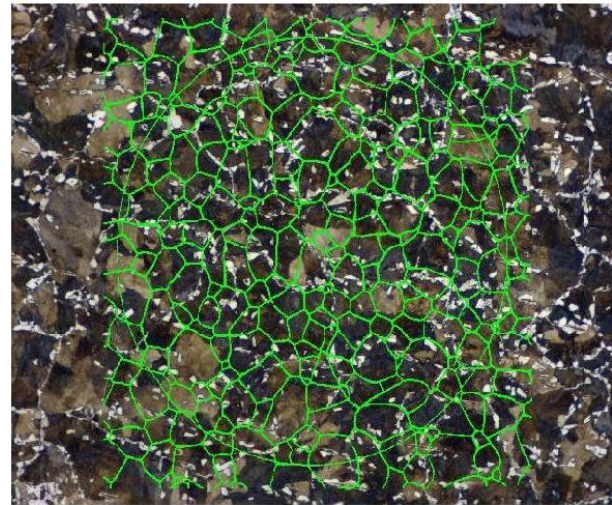
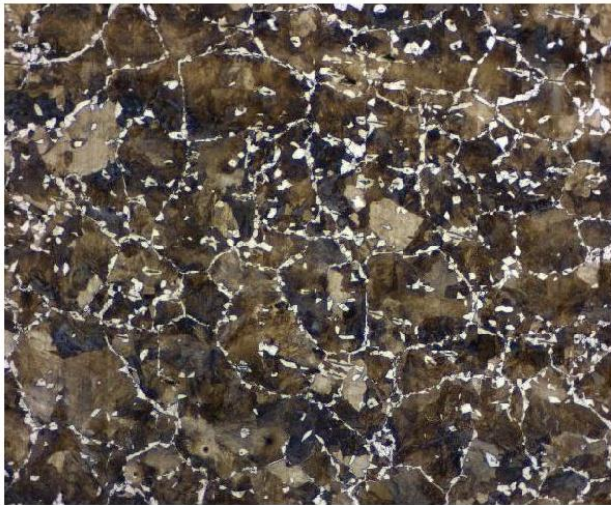


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

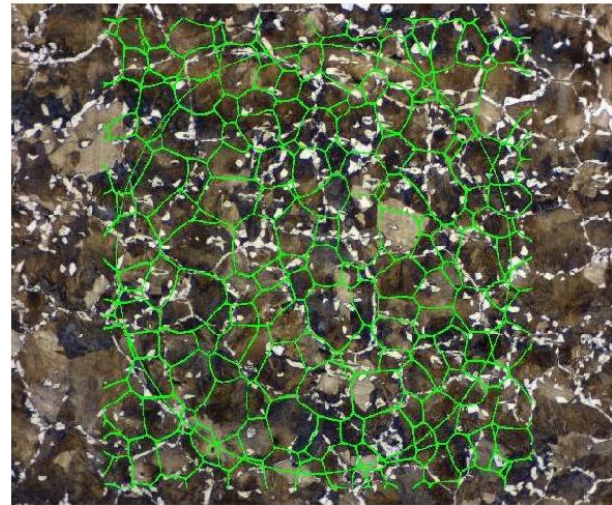
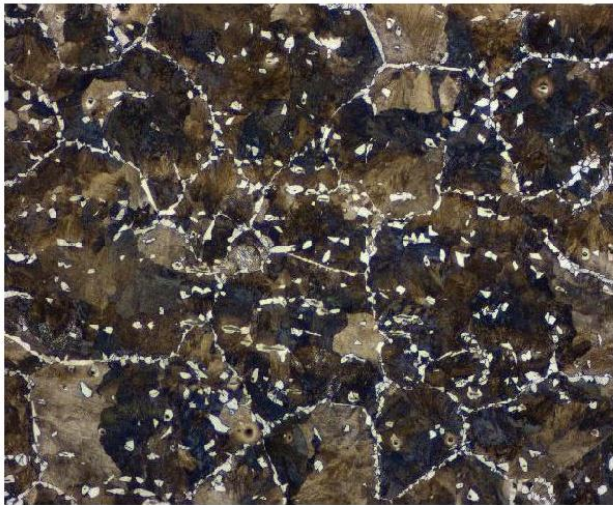


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

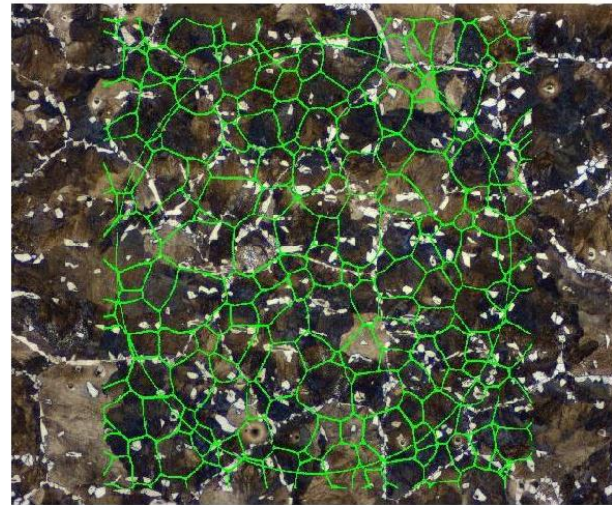


Image with Annotations

Project summary:**General:**

Project No: InputImage1_A00934.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 8/26/2015
Evaluated by: Eduardo Otero, Ismael García
Material: Modelo1
Sample No: Modelo1_M2
No of images: 4
MeanGrain Size Number: 5.50

Order:

Order No:
Description: Modelo1_Muestra2, Tamaño de grano de superficie (Imagen 1), 6mm (Imagen 2), 12mm (Imagen 3) y núcleo (Imagen 4).

Comment:

Checkedby: Eduardo Otero, Ismael Garcia

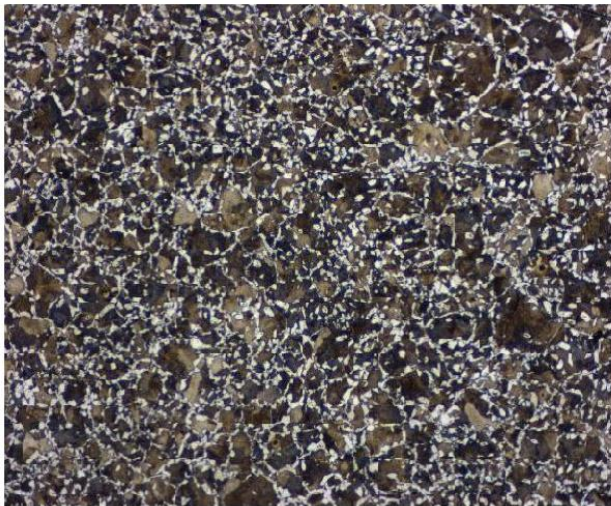
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 6.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

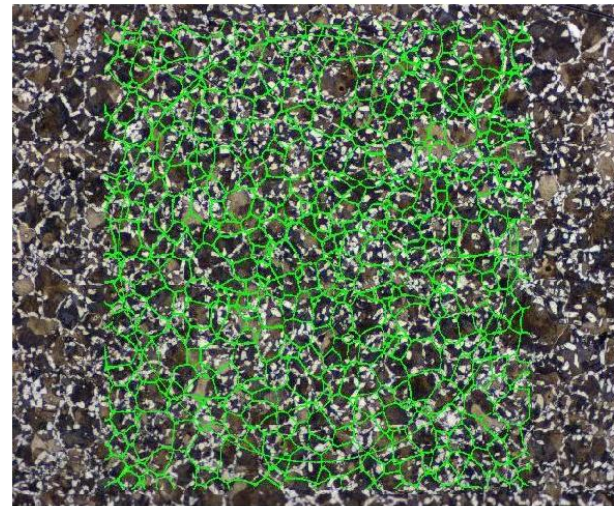
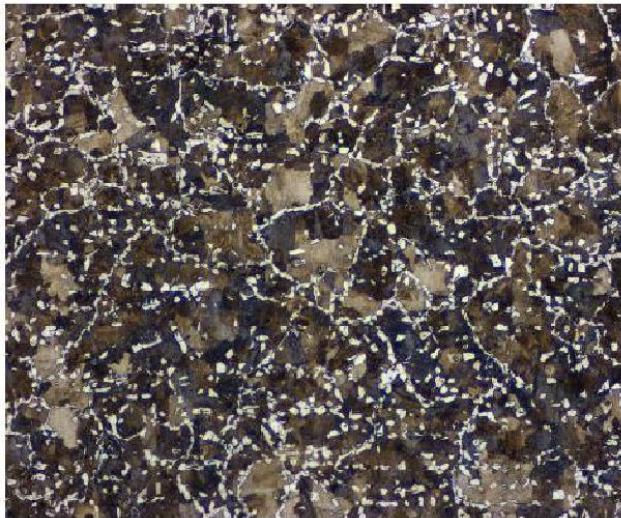


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 5,50

Stretch Factor: 1,00



Original image

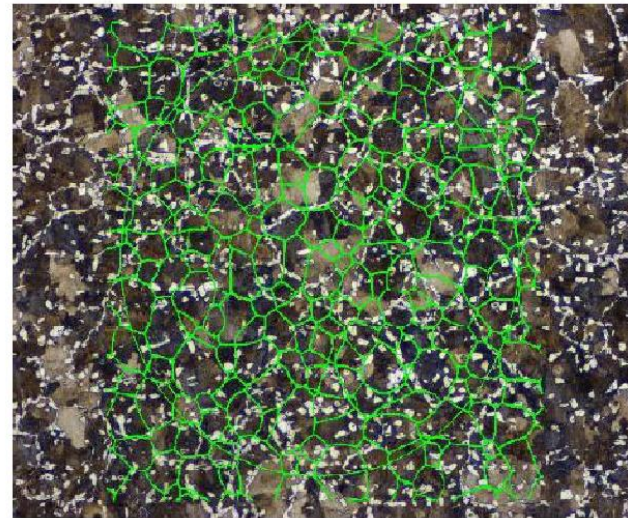
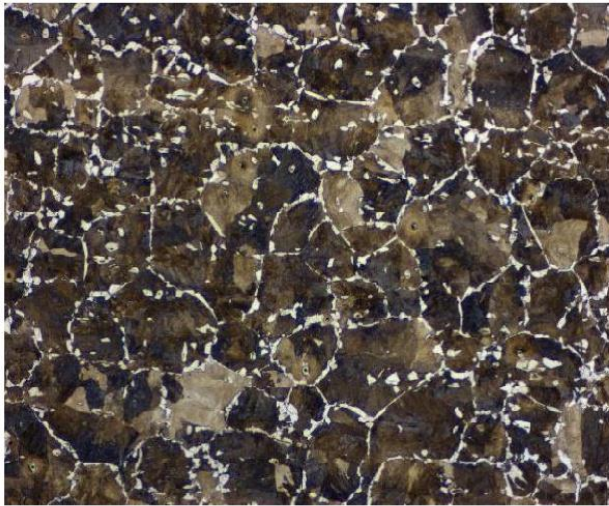


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

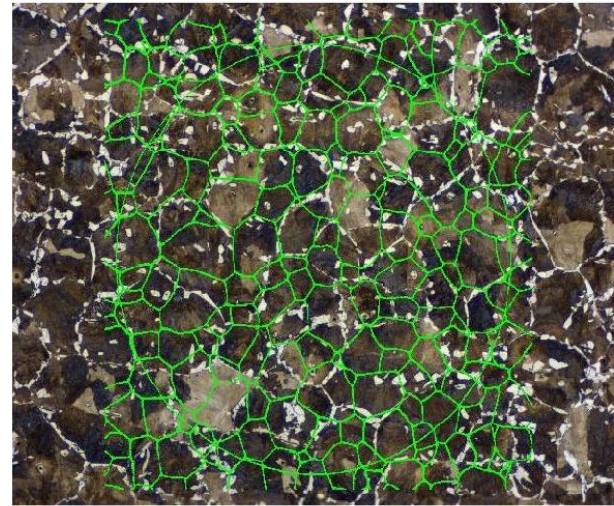
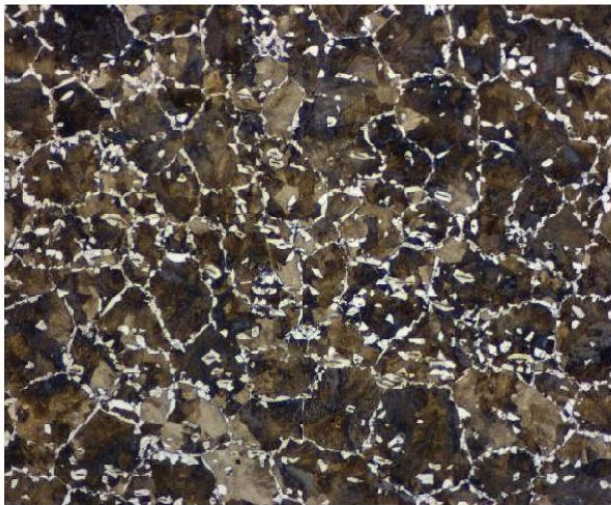


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

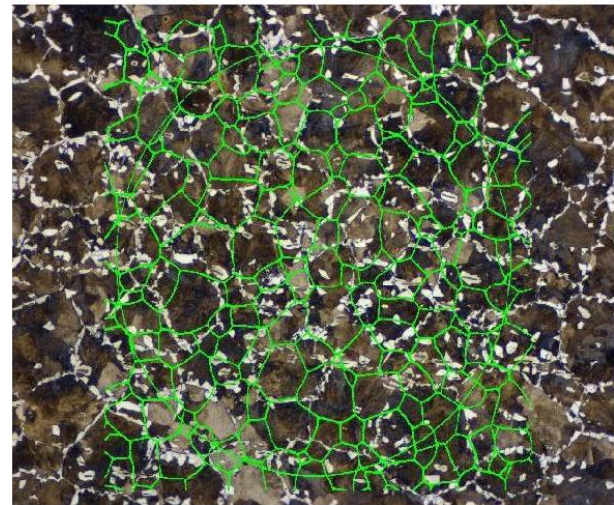


Image with Annotations

Project summary:**General:**

Project No: InputImage1_A00950.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 8/27/2015
Evaluated by: Eduardo Otero, Ismael García
Material: Modelo 2
Sample No: Modelo2_M1
No of images: 4
MeanGrain Size Number: 5.25

Order:

Order No:
Description: Modelo2_Muestra1, Tamaño de grano de superficie Imagen 1), 6mm (Imagen 2), 12mm (Imagen 3) y núcleo (Imagen 4).

Comment:

Checkedby: Eduardo Otero, Ismael Garcia

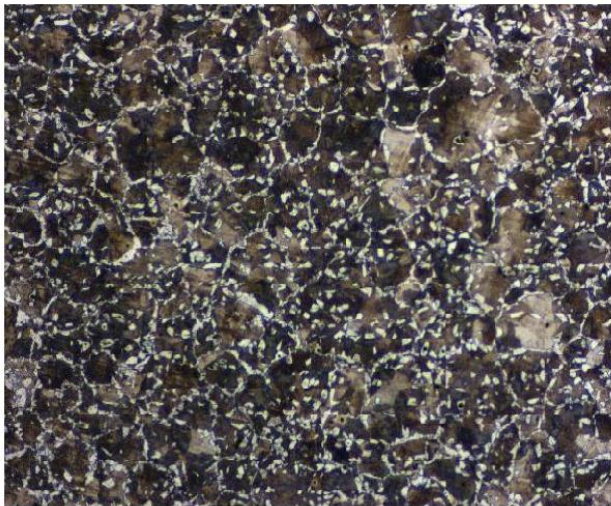
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 6.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

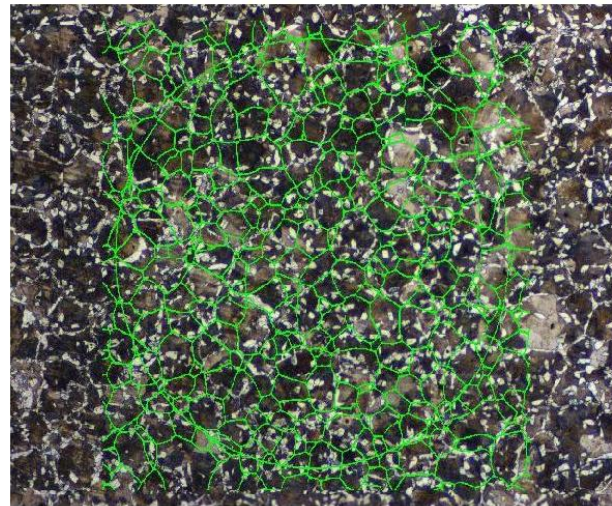
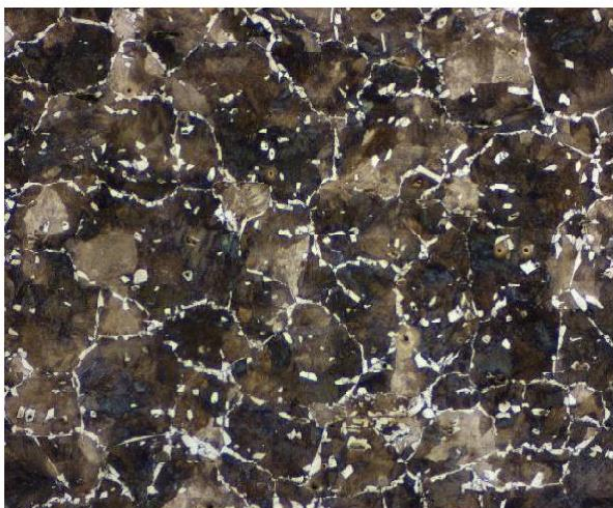


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

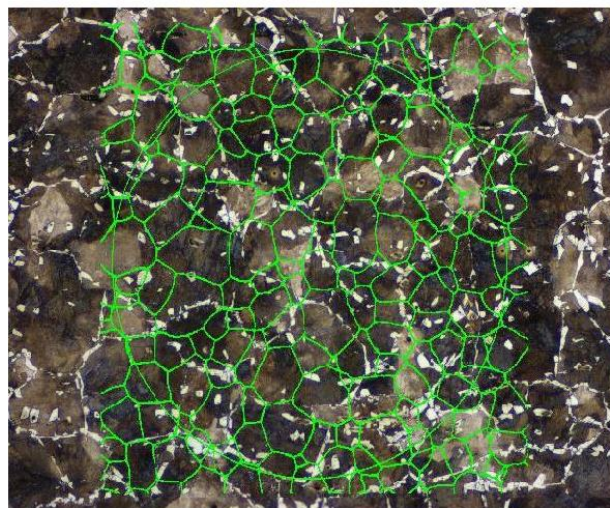
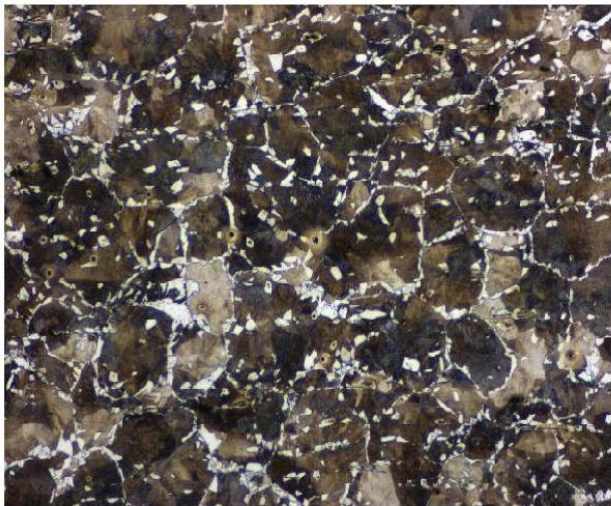


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

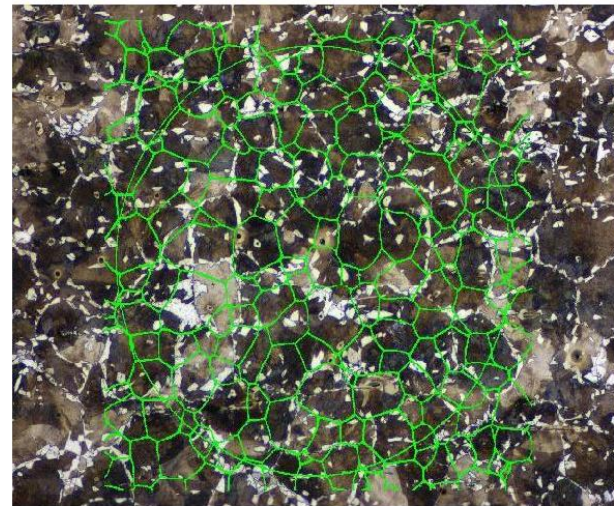
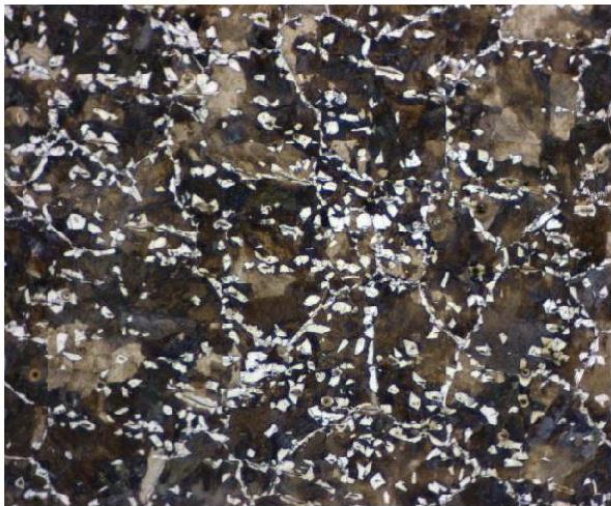


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

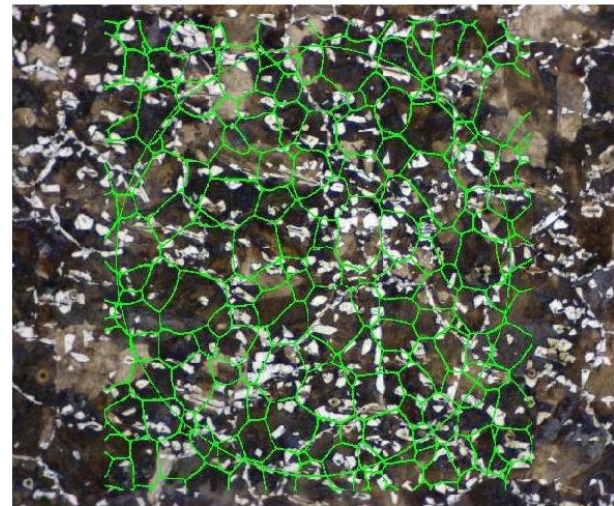


Image with Annotations

Project summary:**General:**

Project No: InputImage1_A00966.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 8/27/2015
Evaluated by: Eduardo Otero, Ismael García
Material: Modelo 2
Sample No: Modelo2_Muestra2
No of images: 4
MeanGrain Size Number: 5.25

Order:

Order No:
Description: Modelo2_Muestra2, Tamaño de grano de superficie (Imagen 1), 6mm (Imagen 2), 12mm (Imagen 3) y núcleo (Imagen 4).

Comment:

Checkedby: Eduardo Otero, Ismael García

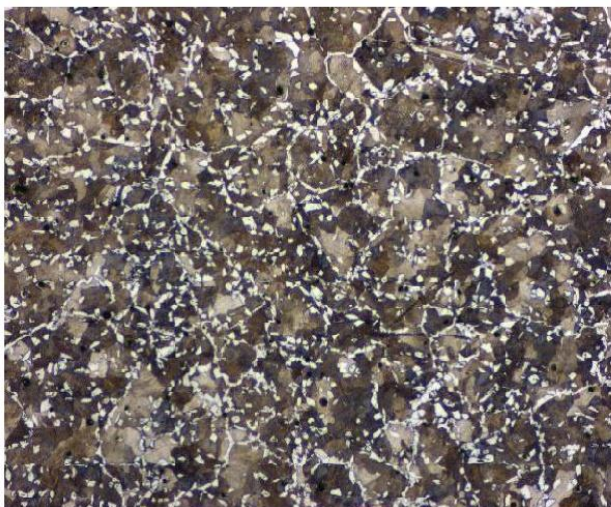
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 6.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

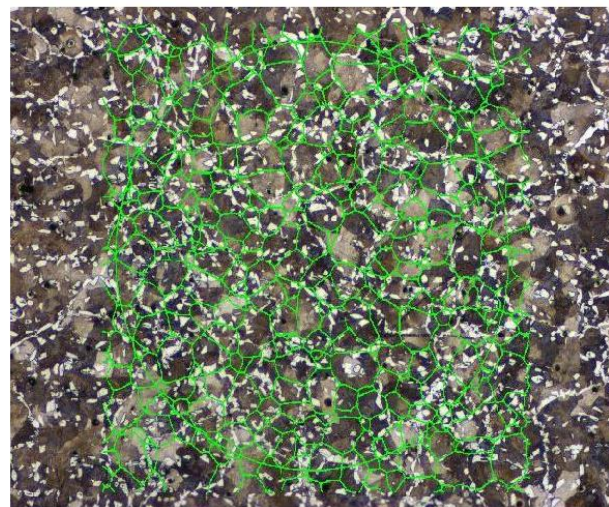
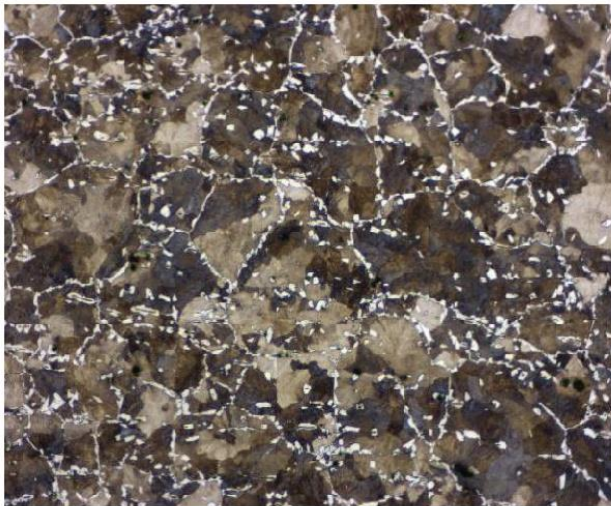


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 5.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

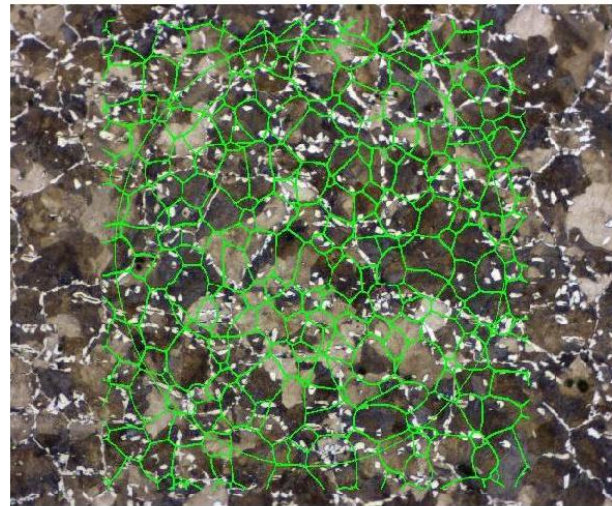
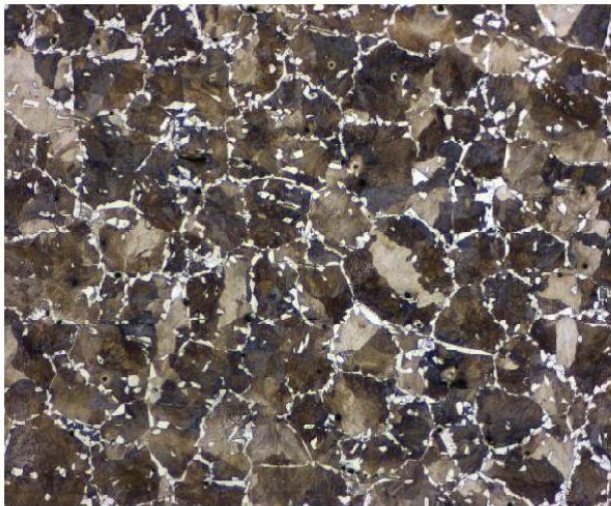


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

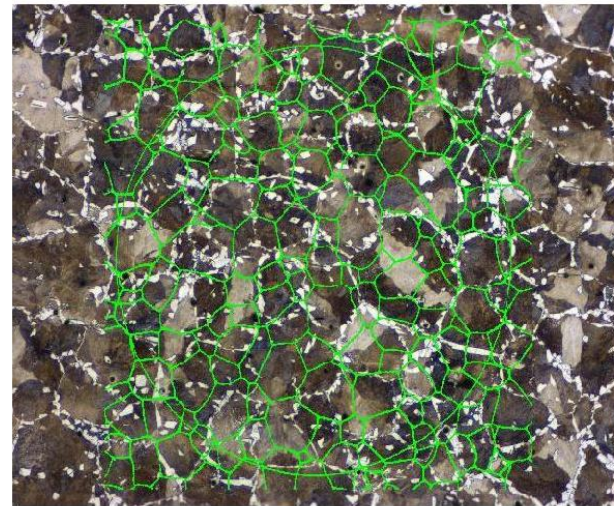
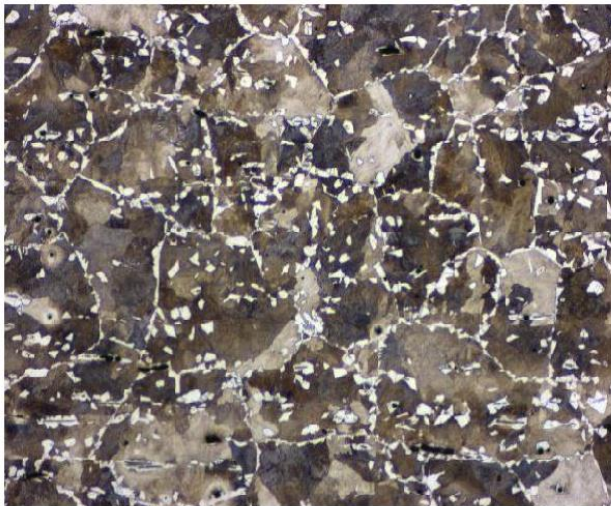


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 4.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

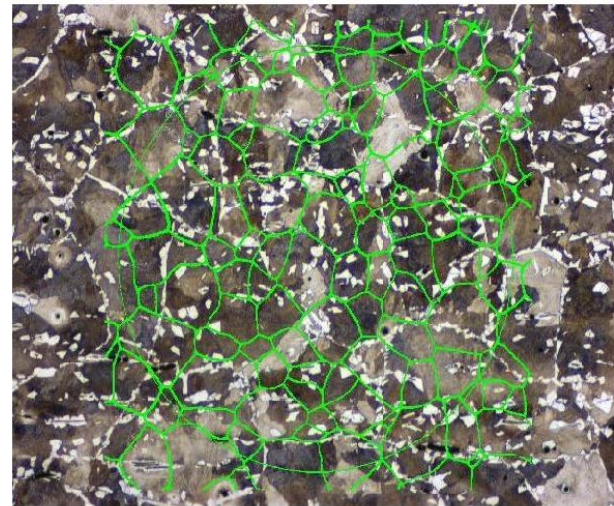


Image with Annotations

Project summary:

General:

Project No: InputImage1_A01141.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 11/5/2015
Evaluated by:
Material: V0.11%+TR 1
Sample No: V0.11%+TR 1
No of images: 4
MeanGrain Size Number: 3.88

Order:

Order No:
Description: V0.11%+TR 1, Tamaño de grano de superficie (Imagen 1), 6mm (Imagen 2), 12mm (Imagen 3) y núcleo (Imagen 4).

Comment:

Checkedby:

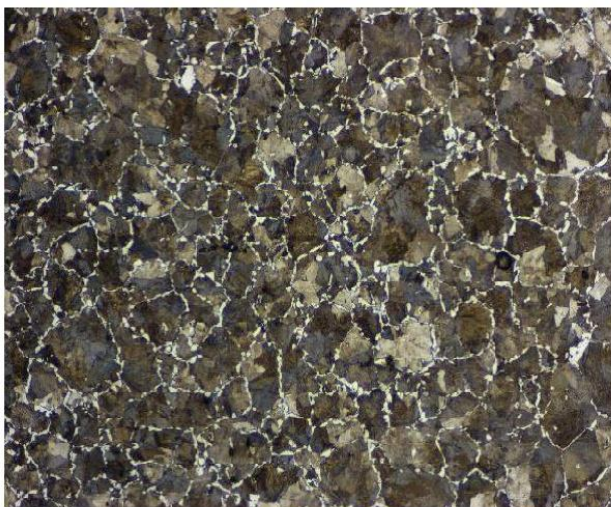
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 5.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

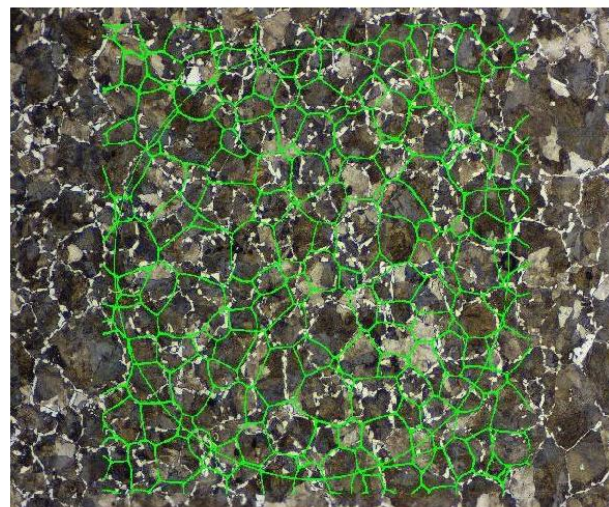
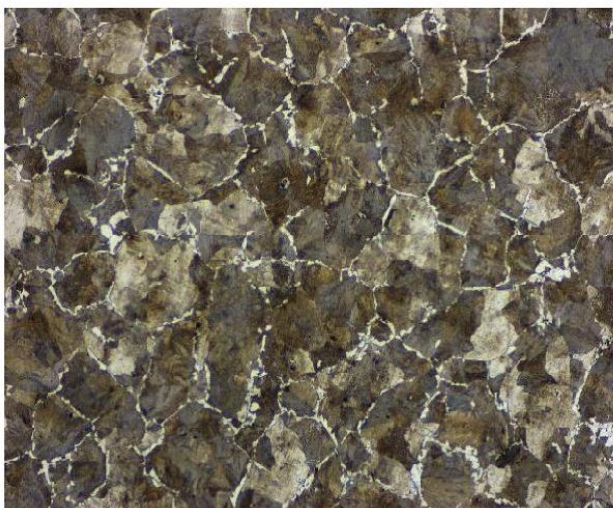


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 4.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

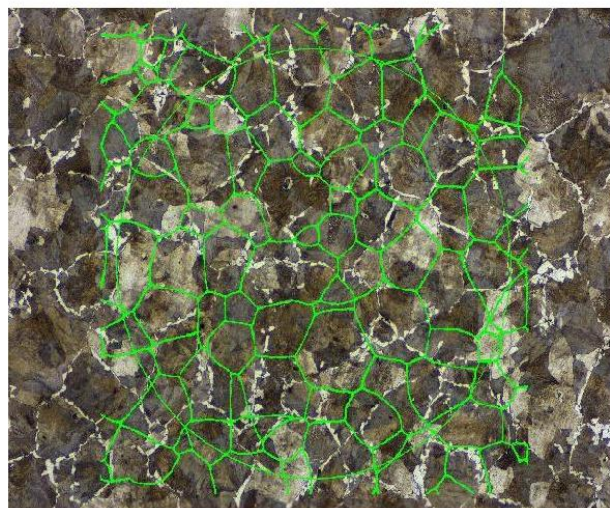
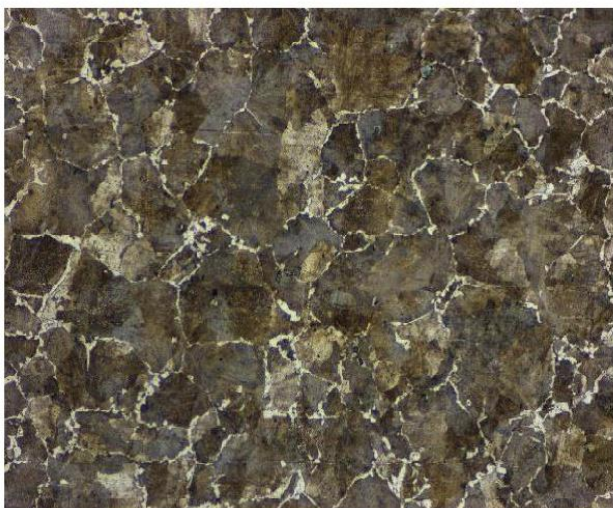


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 3.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

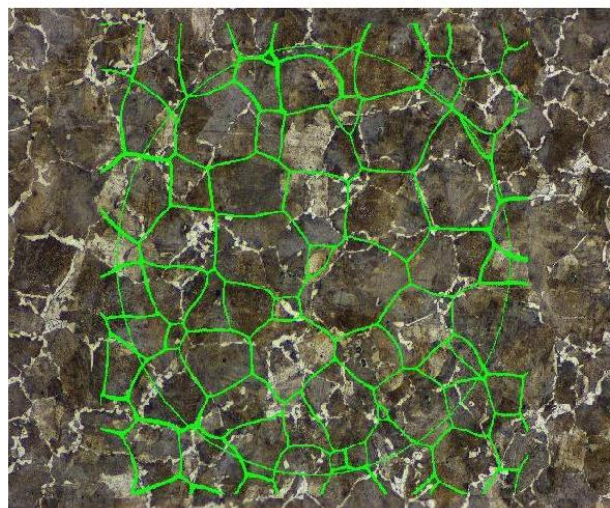
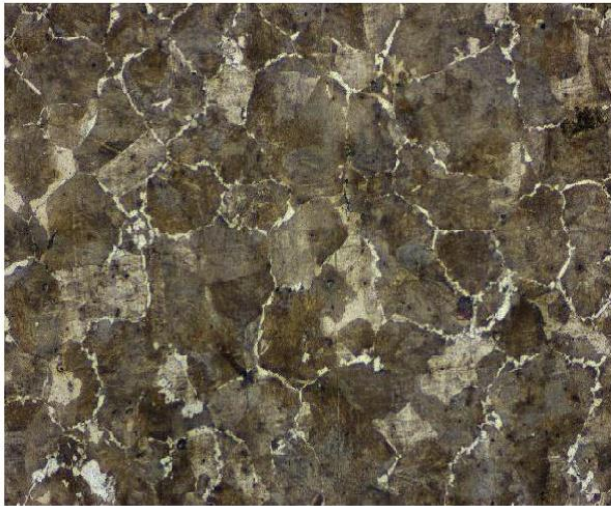


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 3.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

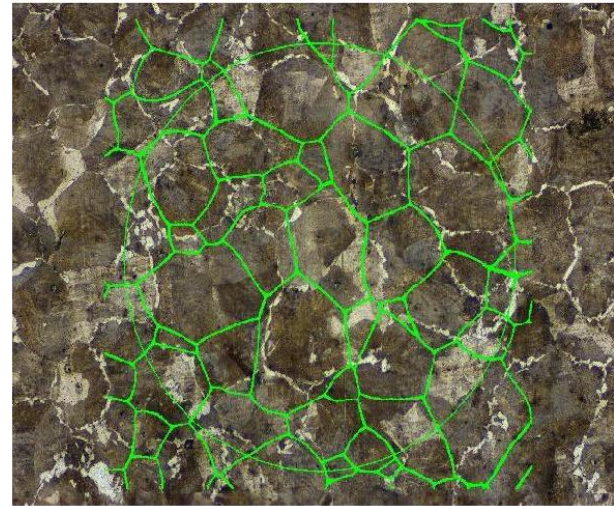


Image with Annotations

Project summary:

General:

Project No: InputImage1_A01125.zvi
Standard: ASTMIB
Method: Comparison
Evaluation date: 11/5/2015
Evaluated by:
Material: V0.11%+TR2
Sample No: V0.11%+TR2
No of images: 4
MeanGrain Size Number: 3.38

Order:

Order No:
Description: V0.11%+TR 2, Tamaño de grano de superficie (Imagen 1), 6mm (Imagen 2), 12mm (Imagen 3) y núcleo (Imagen 4).

Comment:

Checkedby:

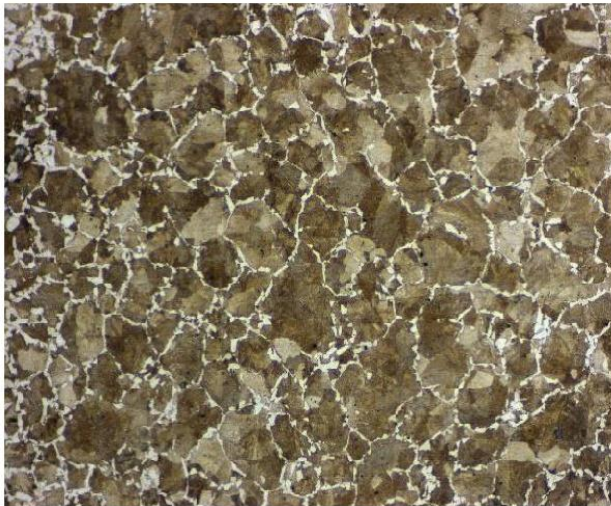
Acquisition parameters:

Contrast Method: Brightfield Refl.light
Objective: 10x
Camera: AxioCamEL
Scaling: 0.0005 Millimeter /Pixel

Image - 1

Grain Size Number: 4.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

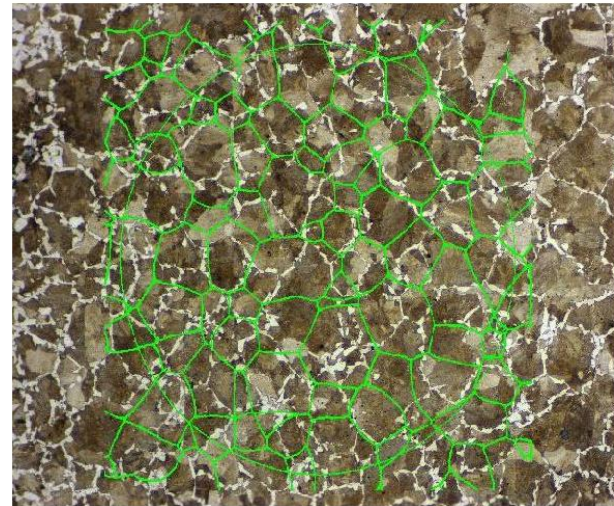


Image with Annotations

Image - 2

Grain Size Number: 3.50

Stretch Factor: 1.00



Original Image

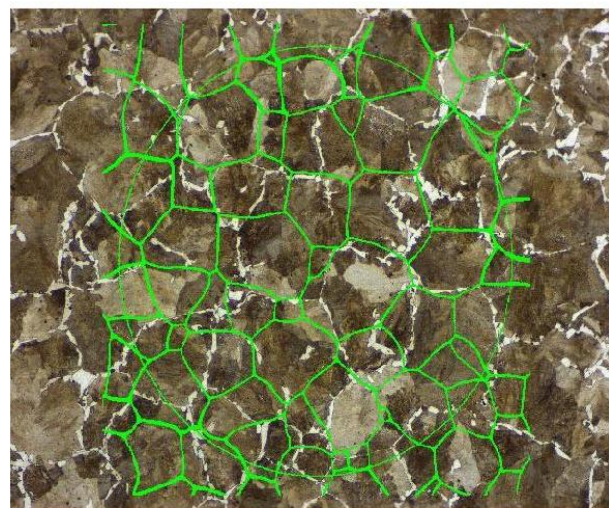
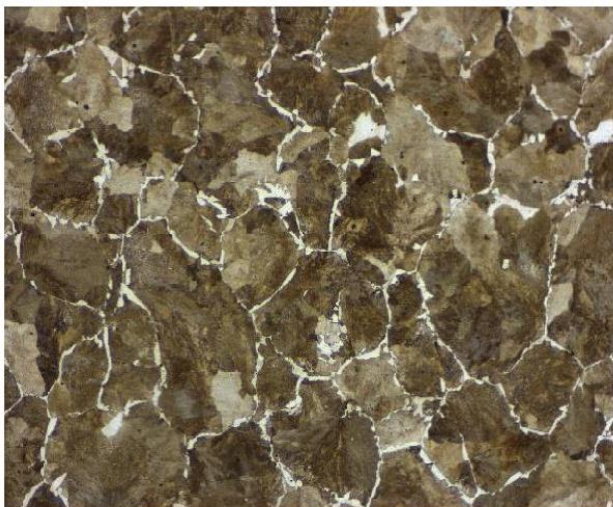


Image with Annotations

Image - 3

Grain Size Number: 3.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

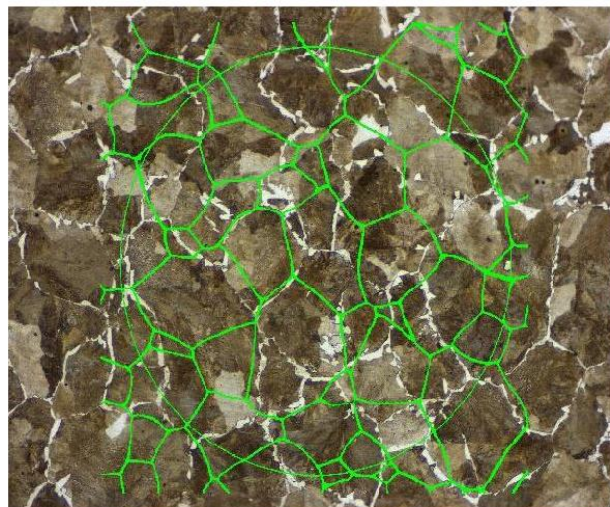
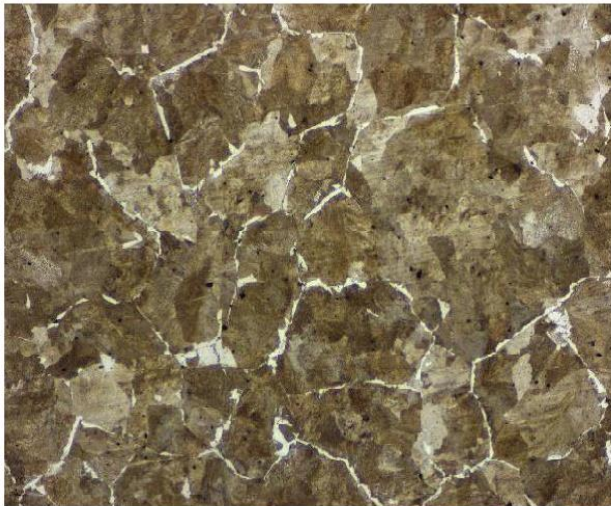


Image with Annotations

Image - 4

Grain Size Number: 3.00

Stretch Factor: 1.00



Original Image

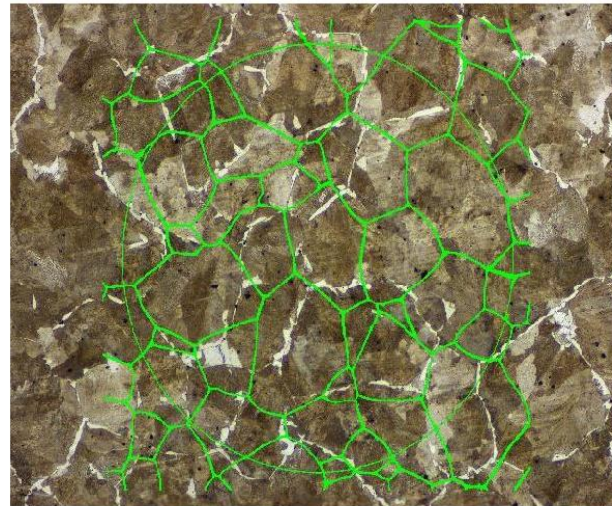


Image with Annotations

APÉNDICE B

Carl Zeiss Microscopy GmbH

Project **Modelo1_M1**

Date **8/27/2015**

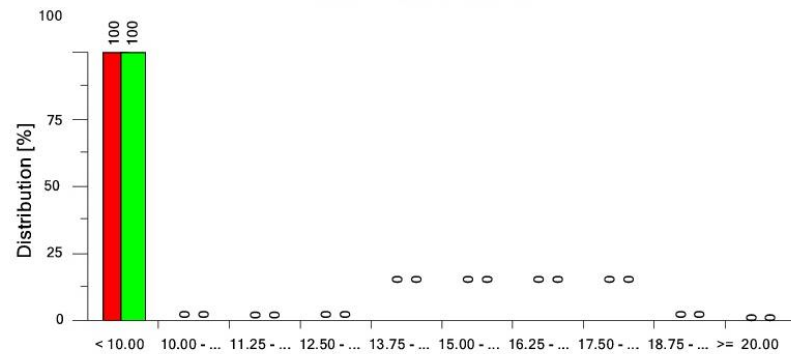
Project summary:

Project No: Modelo1_M1
Evaluation date: 8/27/2015
Number of images: 1

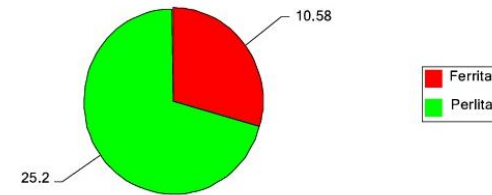
Evaluated by: Eduardo Otero, Isamel García
Material: Modelo1
Sample number: Modelo_M1

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4732	10.578
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19098	25.203

Class Distribution

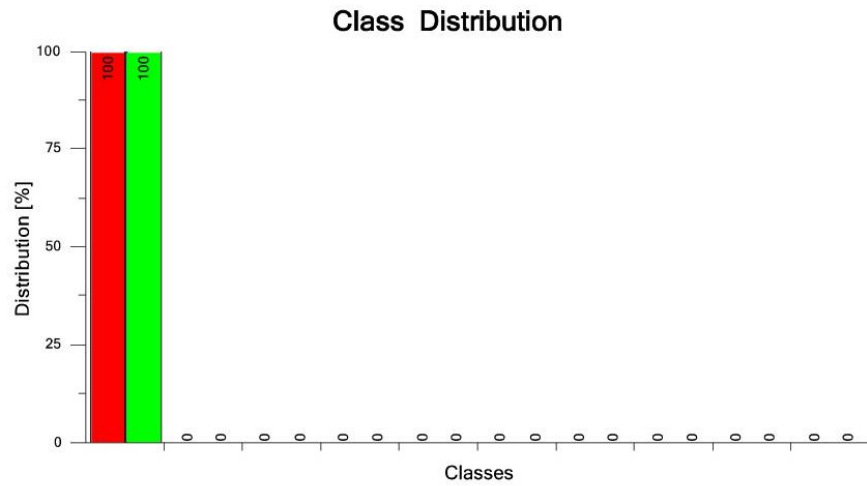


Area Percentage



Results for image 1

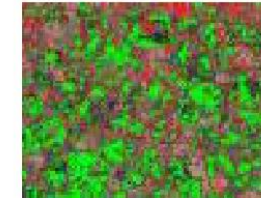
Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4732	10.578
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19098	25.203



Original image



Image with Annotations



Classification settings:Parameter for... **Feret Maximum**Unit for classification: **mm****Acquisition settings:**Contrast method: **Brightfield Refl.light**Objective: **10x**Camera: **AxioCamEL**Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Order No:

Order No:

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Comment:

Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.

Checked by:

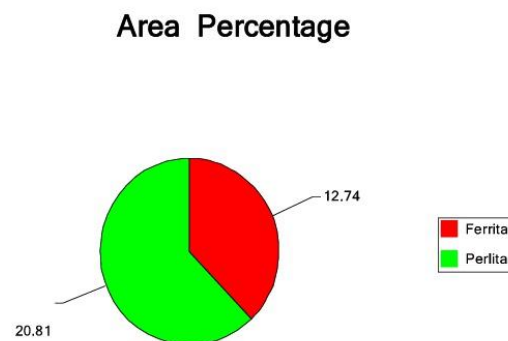
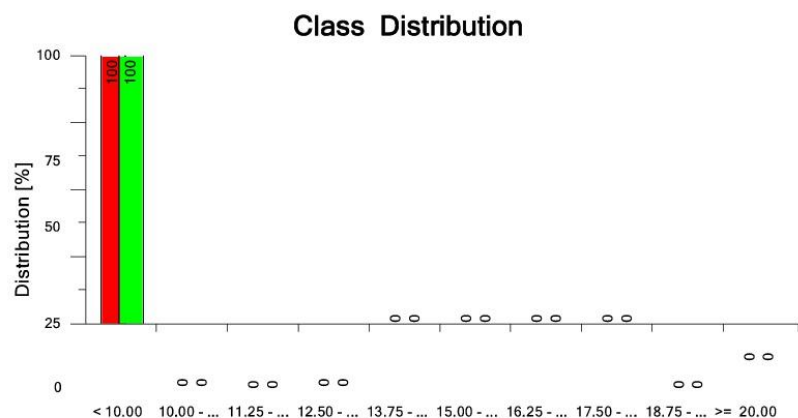
Eduardo Otero, Isamel García

Project summary:

Project No: Modelo1_M2
Evaluation date: 8/27/2015
Number of images: 1

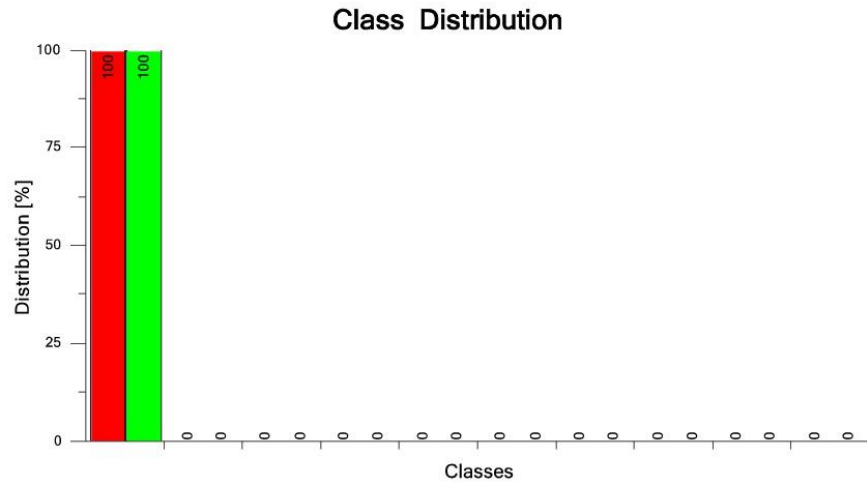
Evaluated by: Eduardo Otero, Isamel García
Material: Modelo1
Sample number: Modelo1_Muestra2

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3611	12.738
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	20898	20.814



Results for image 1

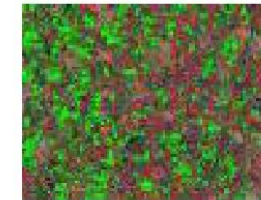
Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3611	12.738
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	20898	20.814



Original image



Image with Annotations



Classification settings:

Parameter for... **Feret Maximum**
Unit for classification: **mm**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Acquisition settings:

Contrast method: **Brightfield Refl.light**
Objective: **10x**
Camera: **AxioCamEL**
Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Order No:**Order No:**

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Comment:

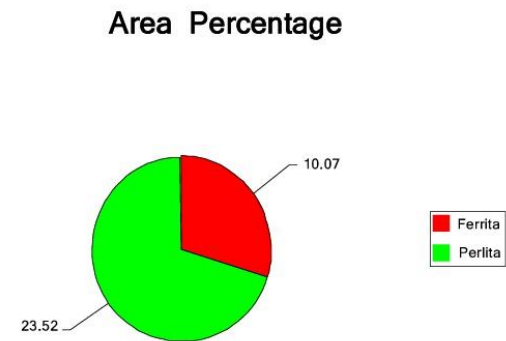
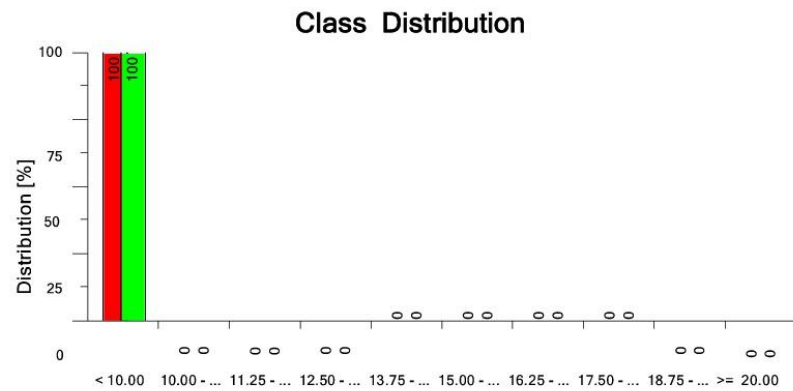
Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.

Checked by:**Eduardo Otero, Isamel García**

Project summary:

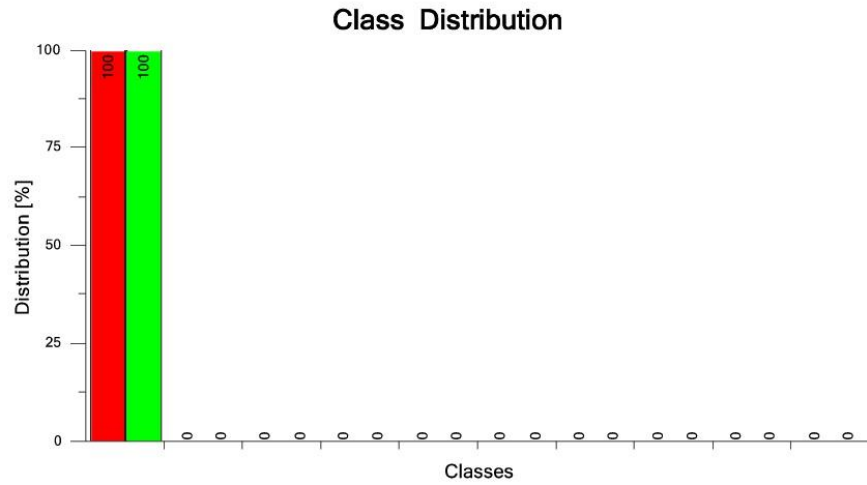
Project No: Modelo2_M1 **Evaluated by:** Eduardo Otero, Isamel García
Evaluation date: 8/27/2015 **Material:** Modelo 2
Number of images: 1 **Sample number:** Modelo2_M1

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4072	10.072
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23155	23.524



Results for image 1

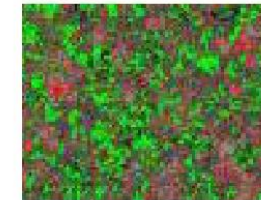
Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4072	10.072
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23155	23.524



Original image



Image with Annotations



Classification settings:

Parameter for... **Feret Maximum**
Unit for classification: **mm**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Acquisition settings:

Contrast method: **Brightfield Refl.light**
Objective: **10x**
Camera: **AxioCamEL**
Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Order No:**Order No:**

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

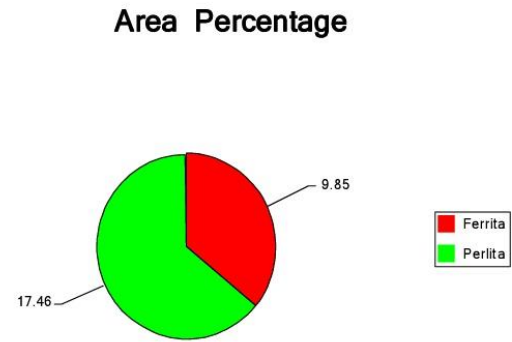
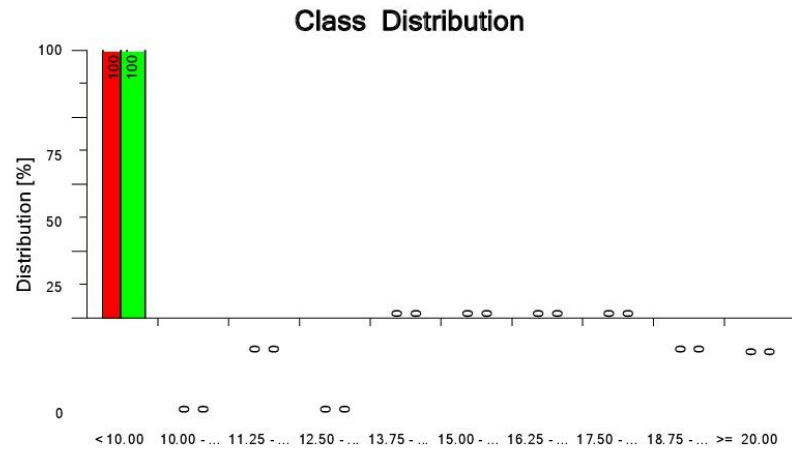
Comment: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Checked by: **Eduardo Otero, Isamel García**

Project summary:

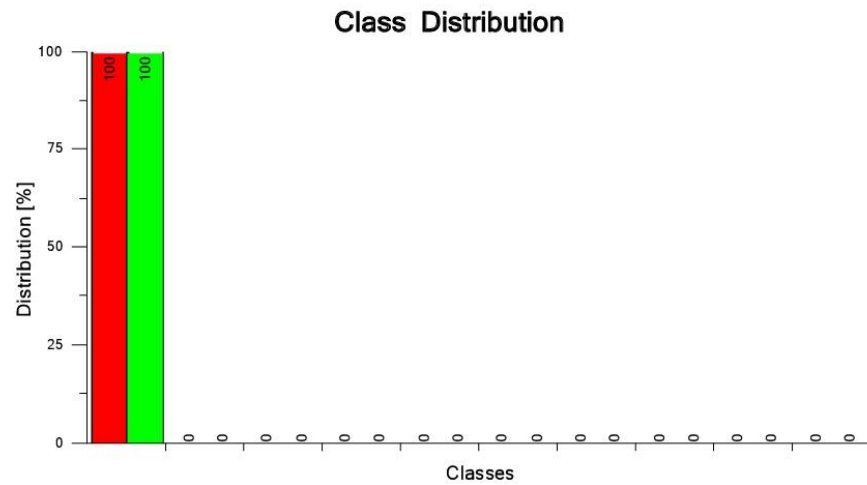
Project No: Modelo2_M2
Evaluation date: 8/27/2015
Number of images: 1
Evaluated by: Eduardo Otero, Ismael García
Material: Material Titular
Sample number: Modelo2_M2

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4077	9.853
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21194	17.465



Results for image 1

Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4077	9.853
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21194	17.465



Original image

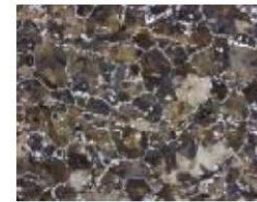
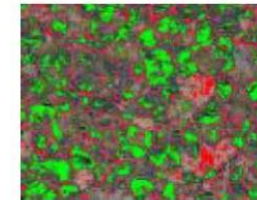


Image with Annotations



Classification settings:

Parameter for... **Feret Maximum**
Unit for classification: **mm**

Acquisition settings:

Contrast method: **Brightfield Refl.light**
Objective: **10x**
Camera: **AxioCamEL**
Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Order No:**Order No:**

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Comment: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

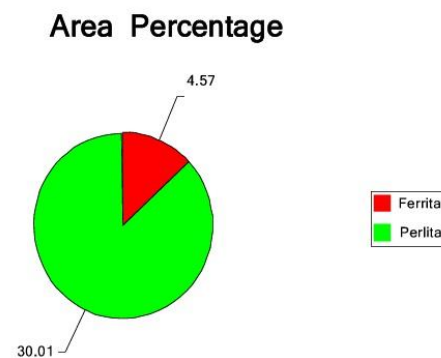
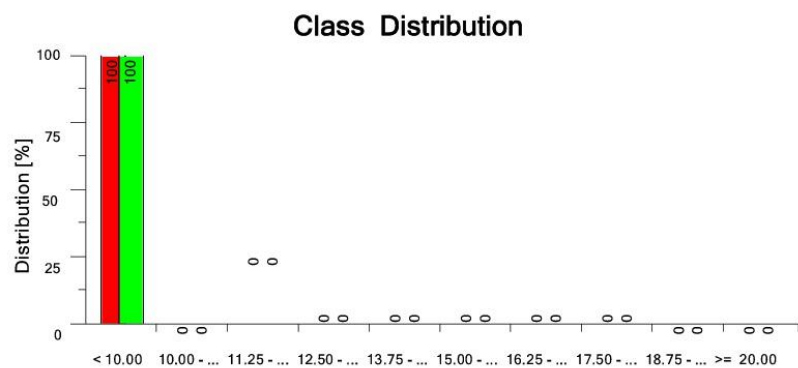
Checked by: **Eduardo Otero, Ismael García**

Project summary:

Project No: V0.11%+TR1
Evaluation date: 11/5/2015
Number of images: 1

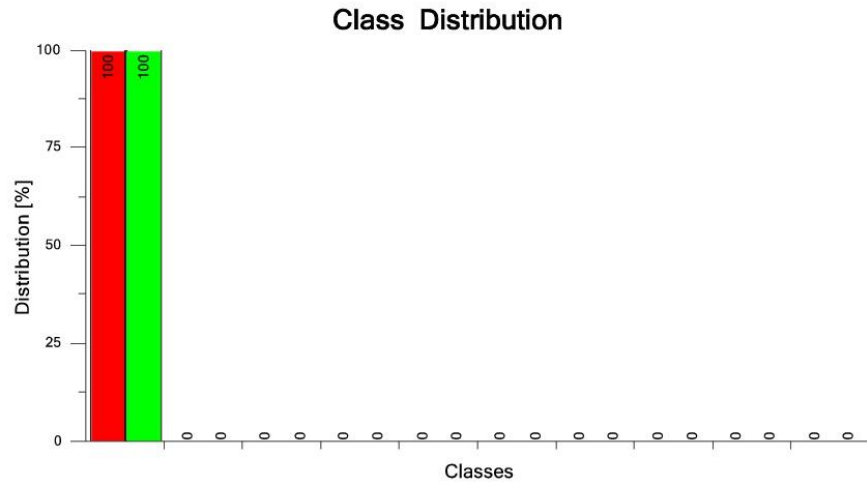
Evaluated by:
Material: V0.11%+TR1
Sample number: V0.11%+TR1

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5153	4.570
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	52346	30.013



Results for image 1

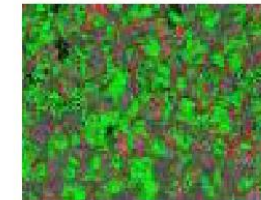
Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5153	4.570
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	52346	30.013



Original image



Image with Annotations



Classification settings:

Parameter for... **Feret Maximum**
Unit for classification: **mm**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Acquisition settings:

Contrast method: **Brightfield Refl.light**
Objective: **10x**
Camera: **AxioCamEL**
Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Order No:**Order No:**

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Comment:

Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.

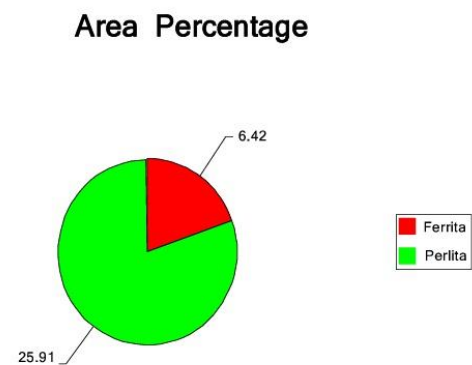
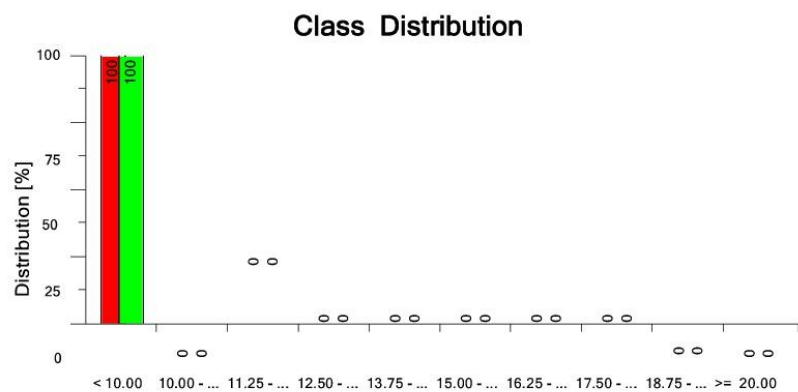
Checked by:

Project summary:

Project No: V0.11%TR2
Evaluation date: 11/5/2015
Number of images: 1

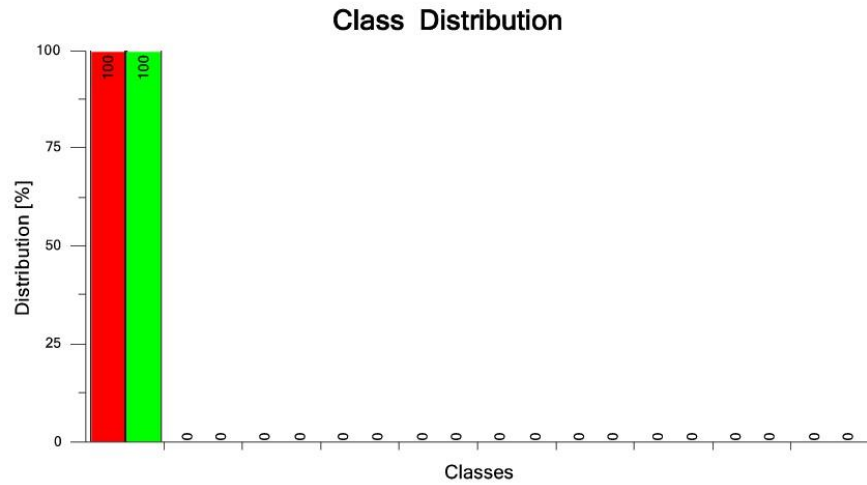
Evaluated by:
Material: V0.11%TR2
Sample number: V0.11%TR2

Phase Name	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9195	6.421
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40101	25.914



Results for image 1

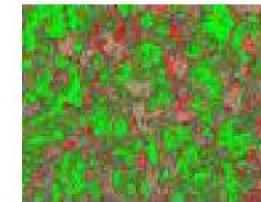
Phase	< 10.00	10.00 - 11.25	11.25 - 12.50	12.50 - 13.75	13.75 - 15.00	15.00 - 16.25	16.25 - 17.50	17.50 - 18.75	18.75 - 20.00	>= 20.00	Object Count	Area Percentage [%]
Ferrita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9195	6.421
Perlita	100.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40101	25.914



Original image



Image with Annotations



Classification settings:

Parameter for... **Feret Maximum**
Unit for classification: **mm**

Acquisition settings:

Contrast method: **Brightfield Refl.light**
Objective: **10x**
Camera: **AxioCamEL**
Scaling: **0.0005 Millimeter/Pixel**

Key	Name	Lower Bound	Upper Bound
I	< 10.00	0	10
II	10.00 - 11.25	10	11.25
III	11.25 - 12.50	11.25	12.5
IV	12.50 - 13.75	12.5	13.75
V	13.75 - 15.00	13.75	15
VI	15.00 - 16.25	15	16.25
VII	16.25 - 17.50	16.25	17.5
VIII	17.50 - 18.75	17.5	18.75
IX	18.75 - 20.00	18.75	20
X	>= 20.00	20	-1

Order No:**Order No:**

Description: **Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.**

Comment:

Porcentaje de Ferrita-Perlita, obtenida a 6mm después de la superficie.

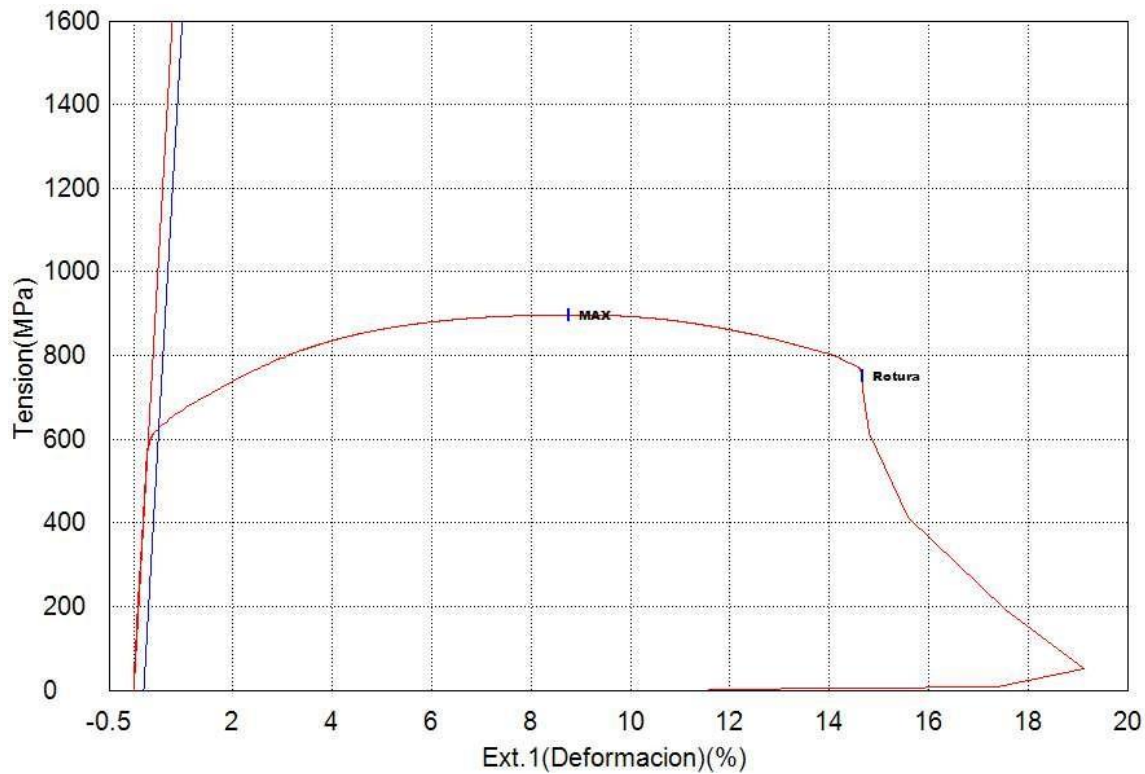
Checked by:

APÉNDICE C

Modelo1_Muestra1

Numero de parte	Modelo 1 (M1)	Nombre de producto	Cigueñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	17/09/2015	Fecha de ensayo	17/09/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Tracción
Nº de partidas:	1	Muestra:	1

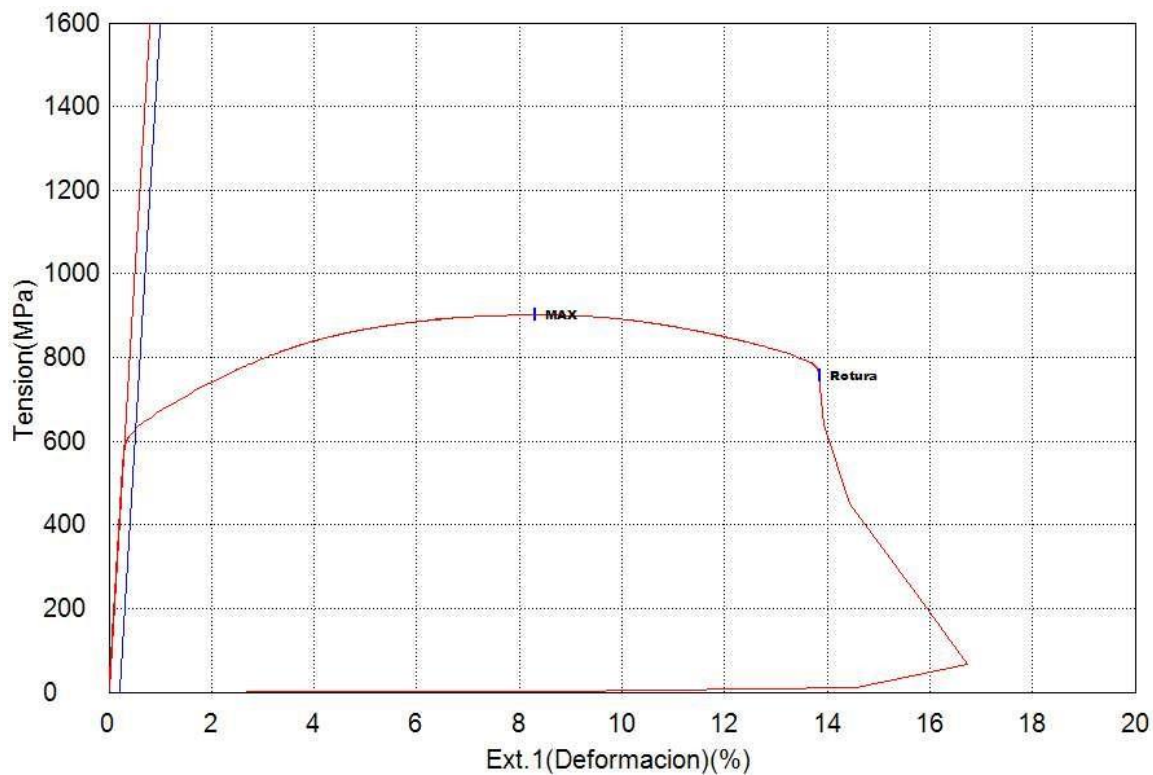
Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1_1	624.149	897.296	14.6700
Media	624.149	897.296	14.6700
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000



Modelo1_Muestra2

Numero de parte	Modelo 1 (M2)	Nombre de producto	Cigüeñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	17/09/2015	Fecha de ensayo	17/09/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Tracción
Nº de partidas:	1	Muestra	2

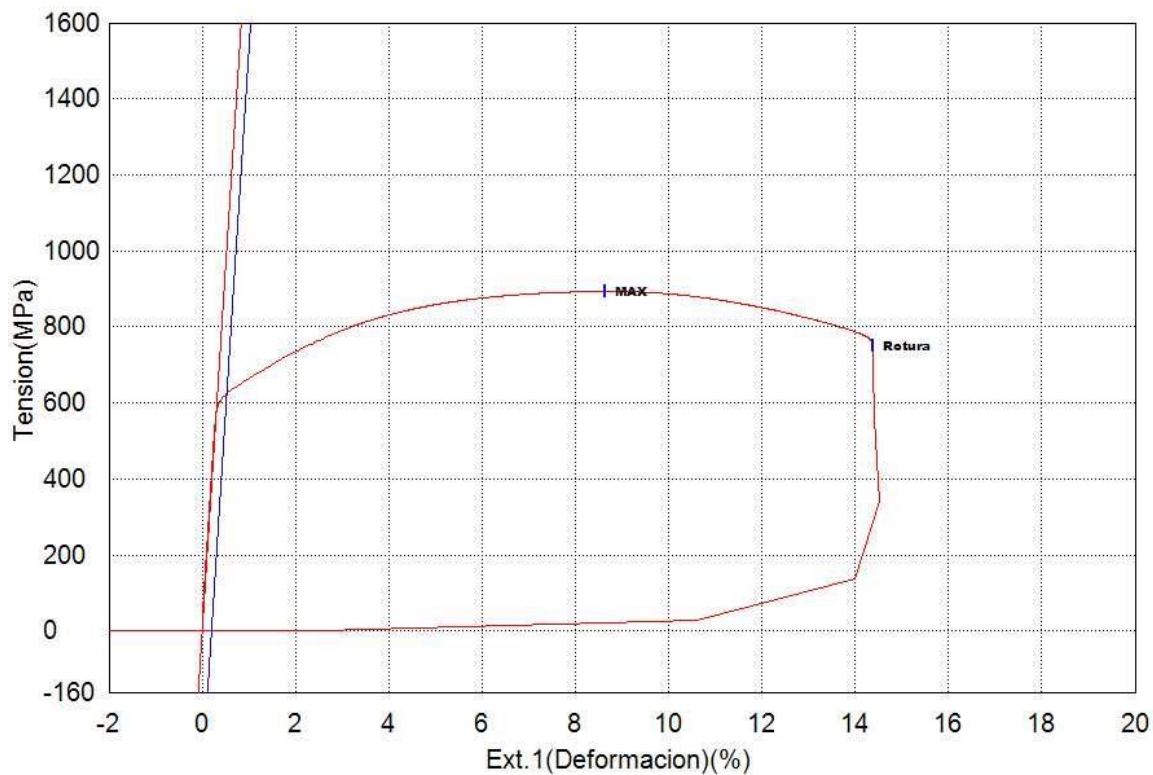
Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1_1	627.648	901.542	13.8475
Media	627.648	901.542	13.8475
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000



Modelo2_Muestra1

Numero de parte	Modelo 2 (M1)	Nombre de producto	Cigüeñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	17/09/2015	Fecha de ensayo	17/09/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Tracción
Nº de partidas:	1	Muestra	1

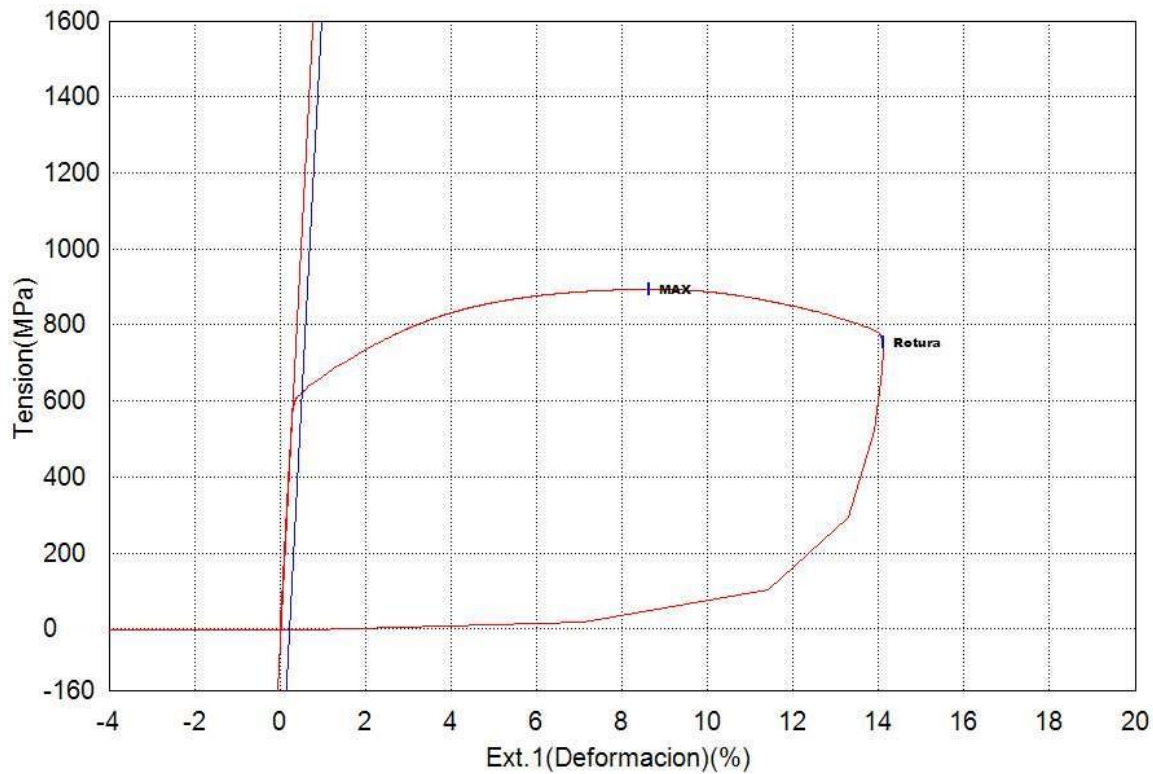
Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1_1	621.930	893.450	14.3850
Media	621.930	893.450	14.3850
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000



Modelo2_Muestra2

Numero de parte	Modelo 2 (M2)	Nombre de producto	Cigüeñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	17/09/2015	Fecha de ensayo	17/09/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Tracción
Nº de partidas:	1	Muestra	2

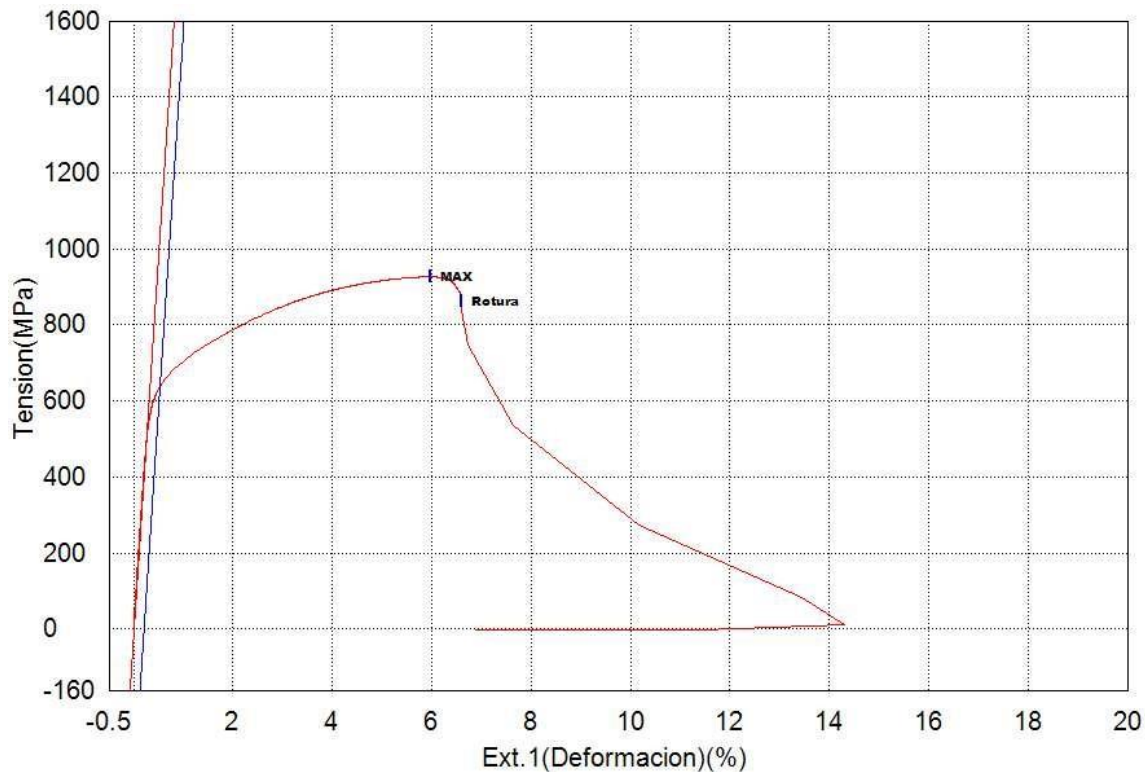
Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1 _ 1	620.616	893.923	14.1125
Media	620.616	893.923	14.1125
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000



V 0.11%+TR 1

Numero de parte	Acero V 0.11%+ TR1	Nombre de producto	Cigüeñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	02/11/2015	Fecha de ensayo	02/11/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Nº de partidas:	1	Muestra	1

Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1 _ 1	633.382	926.713	6.60250
Media	633.382	926.713	6.60250
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000



V 0.11%+TR 2

Numero de parte	Acero V 0.11% + TR2	Nombre de producto	Cigüeñal
Operador		Examinar	
Fecha de informe	02/11/2015	Fecha de ensayo	02/11/2015
Temperatura	23 C	Humedad:	55 %
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Tracción
Nº de partidas:	1	Muestra	2

Nombre	Yield strength	Tensile Strength	Elongacion
Parametros	0.2 %	Calc. at Entire	Sensibilidad 10
Unidad	MPa	MPa	%
1 _ 1	591.549	891.204	6.92500
Media	591.549	891.204	6.92500
Desviacion	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000

