



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS FORENSE DE UN CIGÜEÑAL MEDIANTE TÉCNICA DE FRACTOGRAFÍA Y SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

PROAÑO SÁNCHEZ JAVIER ESTEBAN

javier.proano@epn.edu.ec

DIRECTOR: DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME

carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: SOTO AYMAR LUIS RICARDO

ricardo.soto@epn.edu.ec

QUITO, junio 2018

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **Proaño Sánchez Javier Esteban**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Carlos Díaz
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Ricardo Soto
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Proaño Sánchez Javier Esteban**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Javier Proaño

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación es el final de un trabajo, de entrega y dedicación de varios años, y el logro exitoso de un proyecto de vida de una mujer, una mujer que me dio la vida el, regalo más valioso que pudo darme, una mujer que siempre dijo que quería ver a todos sus hijos profesionales y siendo personas de bien, y a ella, a quien más sino, a mi madre María Sánchez es a quien dedico este proyecto de titulación.

Aunque también este proyecto y la finalización con éxito de la carrera no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de mi padre Jaime Proaño que es un pilar fundamental del hombre que soy y a quien también quiero dedicarle este proyecto.

Y por último pero no menos importante también se lo quiero dedicar a mis hermanos Jaime, Pablo, María y Patricia, que son un ejemplo como persona y que siempre han estado ahí para apoyarme, ayudarme y jalarme las orejas cuando me lo he merecido.

Javo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida, que me permitió llegar hasta este momento. Al ingeniero Carlos Díaz por su paciencia y ayuda para la creación de este proyecto apoyándome a cada paso, a mi madre por su paciencia, cariño y comprensión, a mi padre por siempre apoyarme y estar ahí en este largo y duro camino, a mis hermanos Pablo y María que me han apoyado en más de una forma y a los que no me alcanzara la vida para pagar todo lo que han hecho por mí, a mi hermana Patricia por su ayuda y su paciencia para conmigo, a mi hermano Jaime que siempre que lo he necesitado él ha estado ahí para mí, a mi primo Adrián que más que un primo ha sido como un hermano.

Agradezco también a mi abuelita Mariana que siempre está pendiente de mí, a mis tías Ruth y Germania que han sido un gran apoyo en mi vida, a mis primos Gerardo y Daisy que siempre han estado ahí para mí, a mis primos Enita, Fredy, Rodrigo, Janeth y Silvia que son parte de mi vida, también un agradecimiento más que especial para tía Estilita que en paz descanse, le agradezco muchas alegrías y toda su apoyo y motivación, y en general a toda mi familia.

Además un agradecimiento especial a todos mis amigos del cole, en especial a Chuck, Warman, Lucy y Adry por el apoyo incondicional y su amistad a lo largo de todos estos años, a todos los amigos de esta gran universidad sobre todo a mis amigos los perros Parce, Iván, Lucho, Oyente, Chava, Monstro, Perro, Cris y Bolita, además a Crisme, Wiro, David y Gallo por todas las golferías y borracheras vividas en esta gloriosa institución.

Un agradecimiento para los nuevos amigos que aunque los conozco poco me han demostrado su valía y que son personas en las que puedo confiar. Y más que nada gracias por estar ahí y ayudar en todo lo que estuvo a su alcance para realizar este trabajo Álvaro, Denis, Xavier, Gaby y Juan gracias totales.

Y por último un agradecimiento especial para alguien que aunque está lejos de mí, siempre está presente en mi vida, en mi corazón y en mis pensamientos mi Katy, agradecerle por sus buenos consejos y su buenas jaladas de oreja cuando me lo he merecido, muchas gracias por estar ahí.

Javo

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis o Alcance	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Cigüeñales.....	4
1.1.1. Procesos de manufactura y materiales	4
1.1.2. Proceso de forja	5
1.1.3. Proceso de fundición:	8
1.1.4. Comparación entre los procesos de forja y de fundición	10
1.2. Condiciones de operación y fallo de los cigüeñales	12
1.3. Método de elementos finitos (MEF)	13
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Análisis de composición química	15
2.1.1. Probetas usadas para análisis de composición química	15
2.1.2. Equipo utilizado para análisis de composición química.....	16
2.1.3. Procedimiento para análisis de composición química	16
2.2. Ensayo de dureza.....	16
2.2.1. Probetas usadas para el ensayo de dureza	17
2.2.2. Equipo utilizado para el ensayo de dureza	17
2.2.3. Procedimiento para el ensayo de dureza	18
2.3. Macrografías.....	19
2.3.1. Probetas usadas para las macrografías.....	19
2.3.2. Equipo utilizado para las macrografías	19
2.3.3. Procedimiento para la toma de macrografías.....	20
2.4. Ensayos metalográficos.....	21
2.4.1. Probetas usadas para el ensayo metalográfico	21

2.4.2. Equipo utilizado para el ensayo metalográfico	22
2.4.3. Procedimiento para el ensayo metalográfico	25
2.5. Microscopia electrónica de barrido	26
2.5.1. Probetas usadas para la microscopia electrónica de barrido	26
2.5.2. Equipo utilizado para la microscopia electrónica de barrido	27
2.5.3. Procedimiento para la microscopia electrónica de barrido	27
2.6. Análisis por elementos finitos mediante MEF	28
2.6.1. Creación del modelo CAD	28
2.6.2. Determinación de propiedades básicas y creación de la malla sobre el modelo CAD	29
2.6.3. Apoyos y cargas que van a ser usados en el proceso de simulación	31
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1. Resultados	35
3.1.1. Ensayo de composición química	35
3.1.2. Ensayo de dureza	36
3.1.3. Macrografías de los cigüeñales	36
3.1.4. Micrografías	40
3.1.5. Microscopia electrónica	44
3.1.6. Simulación MEF	45
3.2. Discusión de resultados	47
3.2.1. Análisis de composición química	48
3.2.2. Análisis de durezas	49
3.2.3. Análisis de falla	50
3.2.4. Análisis micrográfico del material	50
3.2.5. Análisis de los resultados de la simulación MEF	52
3.3. Discusión final análisis forense	53
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
4.1. Conclusiones	55
4.2. Recomendaciones	55

5. BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO 1.- Informe de composición química Laboratorio de Fundición	62
ANEXO 2.- Cálculo de la fuerza aplicada al cigüeñal.....	64
ANEXO 3.- Cálculo de los esfuerzos de diseño y máximos del cigüeñal	70
ANEXO 4.- Cálculo del radio de acuerdo	76
ANEXO 5.- Proceso de simulación Inventor.....	78
ANEXO 6.- Proceso de simulación ANSYS	82
ANEXO 7.- Análisis de nodularidad OLYMPUS Stream Essentials cigüeñal C-V.....	86
ANEXO 8.- Análisis de nodularidad OLYMPUS Stream Essentials cigüeñal C-N	90
ANEXO 9.- Análisis porcentual de ferrita y perlita OLYMPUS Stream Essentials cigüeñal C-V	94
ANEXO 10.- Análisis porcentual de ferrita y perlita OLYMPUS Stream Essentials cigüeñal C-N.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cigüeñal de un motor de cuatro cilindros.	4
Figura 1.2. Troqueles para forja de cigüeñales.	5
Figura 1.3. Matriz y tocho para un cigüeñal de un motor de 4 cilindros.	7
Figura 1.4. Fallas causadas por falta de flujo del material.	7
Figura 1.5. Cigüeñal fabricado mediante forja.	7
Figura 1.6. Molde en arena verde.	9
Figura 1.7. Esquema del proceso de fundición en arena verde.	10
Figura 1.8. Cigüeñal de un motor V-6, falla a una resonancia de 2 Hz, fractura de 9.5 mm.	13
Figura 1.9. Ejemplo de elemento para el MEF a) placa agujero, b) elemento finito triangular, c) modelo de elementos finitos y d) modelo refinado de elementos finitos.	14
Figura 2.1. Dimensiones máximas para composición química (mm).	15
Figura 2.2. Muestras extraídas del material para análisis de dureza a) C-N, b) C-V. ...	17
Figura 2.3. Cigüeñales para las macrografías, a) C-N, b) C-V.	19
Figura 2.4. Probetas para los ensayos metalográficos. a) C-N, b) C-V.	22
Figura 2.5. Probetas para la microscopia electrónica de barrido. a) C-N, b) C-V.	27
Figura 2.6. Modelo de cigüeñal.	28
Figura 2.7. Malla automática generada en ANSYS.	30
Figura 2.8. Malla automática generada en Inventor.	30
Figura 2.9. Malla refinada generada en ANSYS.	30
Figura 2.10. Malla refinada generada en Inventor.	31
Figura 2.11. Detalle de ensamble del cigüeñal para motor bóxer de Volkswagen Kombi.	31
Figura 2.12. Distribución de las bielas y pistones en el cigüeñal.	32
Figura 2.13. Posición de la fuerza y las restricciones ANSYS.	32
Figura 2.14. Posición de la fuerza y las restricciones Inventor.	33
Figura 2.15. Pistón y biela para un motor de un Volkswagen Kombi.	33
Figura 2.16. Pesos pistón y biela para un motor de un Volkswagen Kombi, a) Pistón, b) Biela.	34
Figura 3.1. Marcas del maquinado del cigüeñal, 28X.	36
Figura 3.2. Marcas de río en la superficie de fractura, a)4X, b)4X, c)4X.	37
Figura 3.3. Marcas del maquinado y fisura propagada por estas, 28X.	37
Figura 3.4. Zona de la fractura con nódulos de grafito visibles.	38
Figura 3.5. Marcas de funcionamiento y de conformado mecánico, a)8X, b)8X.	38
Figura 3.6. Marcas de río sobre la superficie de fractura, a)4X, b)4X, c)4X, d)4X.	39

Figura 3.7. Zona de la fractura con nódulos de grafito, 28X.....	39
Figura 3.8. Micrografías sin ataque, a) centro 100X, b) borde de fractura 100X.....	40
Figura 3.9. Micrografías con ataque, a) 100X, b) 100X, c) 500X, d) 500X.....	41
Figura 3.10. Radio de acuerdo, a) mitad izquierda 10X, b) mitad derecha 10X.....	41
Figura 3.11. Micrografías sin ataque, a) centro 100X, b) borde de fractura 100X.....	42
Figura 3.12. Micrografías con ataque, a) 100X, b) 100X, c) 500X.....	43
Figura 3.13. Radio de acuerdo, a) mitad izquierda 10X, b) mitad derecha 10X.....	43
Figura 3.14. Microscopia electrónica, a) 51X, b) 508X, c) 15X, d) 68X.....	44
Figura 3.15. Microscopia electrónica, a) 21X, b) 52X, c) 279X, d) 51X.....	45
Figura 3.16. Esfuerzo equivalente de Von Mises Inventor.....	45
Figura 3.17. Esfuerzo equivalente de Von Mises zona de fractura Inventor.....	46
Figura 3.18. Gráfico de convergencia Inventor.....	46
Figura 3.19. Esfuerzo equivalente de Von Mises ANSYS.....	46
Figura 3.20. Esfuerzo equivalente de Von Mises zona de fractura ANSYS.....	47
Figura 3.21. Gráfico de convergencia ANSYS.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones espectrómetro de chispa.....	16
Tabla 2.2. Características del ensayo de dureza para escalas Rockwell.	17
Tabla 2.3. Especificaciones durómetro.	18
Tabla 2.4. Especificaciones microscopio estereoscópico.....	20
Tabla 2.5. Especificaciones cortadora axial de disco.	22
Tabla 2.6. Especificaciones desbastadora de disco.....	23
Tabla 2.7. Especificaciones banco de desbaste fino.....	23
Tabla 2.8. Especificaciones pulidora de paño.	24
Tabla 2.9. Especificaciones microscopio metalográfico.	24
Tabla 2.10. Especificaciones microscopio electrónico de barrido.....	27
Tabla 2.11. Propiedades para la simulación.	29
Tabla 3.1. Valores del ensayo de composición química.....	35
Tabla 3.2. Valores de dureza.	36
Tabla 3.3. Comparación de valores de composición química.....	48
Tabla 3.4. Comparación promedio de durezas.....	49
Tabla 3.5. Análisis de las propiedades del grafito.	51
Tabla 3.6. Análisis de las fases de la matriz de la fundición.....	51
Tabla 3.7. Propiedades hierro dúctil ASTM A536 GR 80-55-06.	52
Tabla 3.8. Esfuerzo de Von Mises.	53

RESUMEN

En este proyecto se realizó el análisis forense por comparación de dos cigüeñales de doble lubricación extraídos del motor de un vehículo Volkswagen 1996 de 1600 CC, los cuales presentan una fractura transversal localizada entre la tercera muñequilla de biela y el muñón central. Para el análisis forense se realizó la toma de macro y micrografías, ensayo de dureza, análisis de composición química y análisis de elementos finitos, la simulación se validó con cálculos analíticos de los esfuerzos generados. Con los resultados de los ensayos y análisis, se determinó la forma como se produjo la fractura y las posibles causas que la pudieron ocasionar. Los resultados muestran que las fracturas se produjeron por un sobre esfuerzo puntual e instantáneo que actúa sobre la muñequilla del tercer cilindro, agravada por las deficiencias que presentan tanto la microestructura como la composición química, dando como resultado las fracturas de carácter frágil que se observan en las macrografías.

Palabras clave: análisis de falla, cigüeñal Volkswagen, fractura de cigüeñal, método de elementos finitos.

ABSTRACT

This project performs a forensic analysis by the comparison of two crankshafts of double lubrication extracted from the engine of a 1996 Volkswagen vehicle of 1600 CC, the crankshafts presents a transversal fracture located between the third crankpin and the central stump. For this forensic analysis, macro and micrographs, hardness tests, chemical composition analysis and finite element analysis must be performed, the simulation will be validated by calculations of the stress that are generated. With the results of the tests and analysis performed, the manner in which the referred fracture occurred and the possible scenario that caused it was determined. The results show that the fractures were produced by a punctual and instantaneous stress that acts on the crankpin of the third cylinder, aggravated by the deficiencies that present the microstructure and the chemical composition, resulting in fractures of fragile nature observed in the macrographs

Keywords: crankshaft fracture, failure analysis, finite element method, Volkswagen crankshaft.

ANÁLISIS FORENSE DE UN CIGÜEÑAL MEDIANTE TÉCNICA DE FRACTOGRAFÍA Y SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

INTRODUCCIÓN

El cigüeñal es uno de los principales y más grandes componentes de los motores de combustión interna el mismo que posee una geometría compleja, que permite convertir el movimiento rectilíneo de los pistones en movimiento rotatorio por medio del principio del mecanismo biela manivela (Payri & Desantes, 2011). El movimiento rectilíneo inicial es generado por la explosión del combustible dentro de la cámara de combustión en el block del motor que genera una presión sobre el pistón el cual mueve la biela y ésta a su vez el cigüeñal, originando la energía para producir el movimiento del vehículo (Ganesan, 2006).

Para este estudio se usaron dos cigüeñales extraídos de un vehículo marca Volkswagen, modelo Kombi 1996, con un motor bóxer de 1600 CC, los que presentan una rotura transversal completa, entre la tercera muñequilla y el muñón central. Ambos cigüeñales son genéricos y no se tiene información sobre los materiales y procesos de fabricación usados en éstos. Tampoco se posee información relevante al estudio sobre el cigüeñal original del vehículo. Analizar el porqué de la fractura de los cigüeñales es el principal objetivo de este estudio, verificar cual fue la causa de la fractura ya sea una falla mecánica del motor o una deficiencia en el proceso de selección y maquinado de los materiales del cual están conformados.

El análisis mediante el método de elementos finitos (MEF) se lo realizó con la ayuda de dos software, aplicando las restricciones adecuadas y la carga máxima a la que estaría sujeto el cigüeñal dentro del motor y en un momento específico de su funcionamiento, estableciendo a través de los resultados el lugar donde se producen los máximos esfuerzos, y con ello tener una idea clara del lugar donde se pueden producir las fracturas.

Los daños en los cigüeñales pudieron darse debido a fallas mecánicas en el motor, las mismas que pueden ser causadas por un desalineamiento de sus componentes, un mal ensamble, o un error en el proceso de conducción del vehículo. Otros factores que pueden influenciar en la falla de este elemento son una deficiente selección de los materiales o en los procesos de manufactura del componente, lo que conlleva a que se

presenten discontinuidades, que pueden ocasionar fisuras o fracturas completas en los cigüeñales (Wang, Zhao, & Wang, 2005).

Si no se produce una pérdida total del motor al momento de la fractura del cigüeñal, éste puede ser reemplazado por uno nuevo. Para reemplazar este elemento el mercado ofrece dos opciones original y genérico, la diferencia principal es el costo, ya que un repuesto original puede tener un valor elevado, y uno genérico que cumple la misma función puede ser mucho más económico, por lo cual estos son más asequibles y son los más cotizados por los compradores.

Los cigüeñales genéricos deben cumplir con requerimientos mecánicos exigentes dentro del motor, para no sufrir desperfectos bajo condiciones normales de funcionamiento, por lo cual la selección adecuada de los materiales y los procesos de fabricación es muy importante previo al maquinado del cigüeñal (Montazersadgh & Fatemi, 2007). Esto garantiza que el cigüeñal no falle antes de cumplir su vida útil y que si se produce un daño en el motor, éste no sea causado por desperfectos en el cigüeñal.

Por tanto al ser el cigüeñal un elemento fundamental en el funcionamiento de los vehículos de combustión interna un daño (fisura o fractura) en éste es de gran preocupación, ya que puede afectar otras partes muy importantes y dañar el motor. Al analizar las fallas producidas en estos cigüeñales se podrá establecer que parámetros se deben controlar para mejorar la calidad y rendimiento de estos elementos mecánicos.

Pregunta de Investigación

¿Por qué se produjo la falla en los cigüeñales si aún no se cumplía su vida útil, fue a causa del material utilizado, de los procesos realizados para su manufactura o por una falla mecánica interna del motor?

Objetivo general

Analizar la falla de un cigüeñal mediante técnica de fractografía y simulación mediante método de elementos finitos (MEF).

Objetivos específicos

- Recolectar los datos acerca de funcionamiento, operación y comportamiento frente a cargas aplicadas.
- Obtener macrografías para el caso de estudio.
- Realizar los ensayos mecánicos y químicos.
- Analizar la rotura en el cigüeñal empleando los diferentes criterios de fractura.
- Utilizar software que permita evaluar de manera más real el comportamiento de un cigüeñal bajo cargas.
- Establecer la o las causas de falla en el elemento.
- Analizar los resultados que se obtuvieron de la simulación del elemento y compararlos con los criterios de fractura y los resultados de los análisis mecánicos.

Hipótesis o Alcance

- El análisis de falla determinara los factores que condujeron a que se produzca la fractura en los cigüeñales. Las que podrían ser un desalineamiento de los componentes, deficiente composición química, defectos en la microestructura del material, sobreesfuerzo producido sobre estos o una combinación de algunos o todos los anteriores.
- La simulación del elemento se realizará en base a un modelo idealizado del mismo, con las propiedades idóneas del material del cual debería estar conformado, demostrando que la suposición del por qué se produjo la falla es correcta.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se expone la importancia de los cigüeñales, su funcionalidad, sus procesos de fabricación y como afectan a su estructura final, los mecanismos de falla más comunes y como se producen las mismas en los cigüeñales, y una explicación simple de que es y cómo funciona el método de elementos finitos.

1.1. Cigüeñales

Son uno de los principales elementos dentro de los motores de combustión interna, se encargan de transformar el movimiento rectilíneo en movimiento rotacional, utilizando el principio del mecanismo biela manivela, están compuestos de una o más muñequillas y contrapesos que generan y mantienen el movimiento rotacional de éste. En la figura 1.1 se puede observar un cigüeñal para un motor de cuatro cilindros en línea.



Figura 1.1. Cigüeñal de un motor de cuatro cilindros.
(Fuente Ali Keskin, 2010)

El movimiento se produce por el impulso que genera la explosión de la mezcla aire combustible en las cámaras de combustión, ésta ejerce una fuerza sobre los pistones por el aumento de presión, la que se transmite a través de las bielas hasta el cigüeñal, ya que éstas están abrazadas mediante cojinetes de rodadura a las muñequillas del cigüeñal.

1.1.1. Procesos de manufactura y materiales

Los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de cigüeñales son los aceros forjados y las fundiciones de hierro nodular. Por el desempeño que poseen estos materiales a esfuerzos de impacto, estáticos y cíclicos son de gran interés para la industria automotriz, ya que presentan gran confiabilidad a la resistencia a dichos esfuerzos. Comparando los procesos usados en la manufactura tanto del acero forjado como de las fundiciones de hierro nodular, las diferentes prestaciones que presentan, el tiempo de fabricación y costos, que existen entre ambos, se determinan las razones por las que para la manufactura de elementos genéricos se usan generalmente hierro fundido nodular.

1.1.2. Proceso de forja

Es el proceso donde se realiza el conformado mecánico mediante la deformación plástica del material. Existen dos tipos de forja en frío y en caliente, la diferencia radica en que en la forja en caliente se realiza con el material reblandecido por un aumento de la temperatura a valores entre 500° a 750° C. El conformado se produce por estirado, doblado, acuñado y extrusión. La forja en caliente reduce la presión necesaria para el proceso, aumenta la ductilidad del acero, elimina la necesidad de recocido después de la forja y conserva las mejoras de las propiedades intrínsecas de la forja. El uso de bajas temperaturas en el proceso de forja previene y elimina la formación de óxido sobre los elementos y permite tener una alta precisión dimensional.

Sin embargo, aun con las ventajas que presenta el proceso de forja en frío, tiene ciertas limitaciones en las tolerancias finales y la forma del componente dentro del espacio de trabajo. La forja en caliente ocurre en la zona plástica del material, de manera tal que la recristalización ocurre simultáneamente con la deformación, evitando el endurecimiento por deformación. Los cigüeñales al tener una geometría muy compleja, resulta imposible que se los pueda obtener por trabajado en frío, por tanto se los produce por forja en caliente.

Para la creación de los cigüeñales por forja en caliente se usan troqueles cerrados, que someten al material base a una presión y temperatura adecuadas. Dando como resultado una pieza de alta calidad a un costo moderado. Estos elementos ofrecen una alta relación peso/resistencia, dureza, resistencia al impacto y a la fatiga, que son propiedades de vital importancia en el rendimiento de éstos. En la figura 1.2 se puede observar la complejidad de los troqueles usados en la forja de cigüeñales.



Figura 1.2. Troqueles para forja de cigüeñales.
(Fuente 3DCadPortal, 2012)

Para este proceso el material debe cumplir dos condiciones básicas:

- a) Baja resistencia al flujo para que las presiones en el troquel se mantengan dentro de la capacidad de resistencia del material y de la constitución del mismo.
- b) La capacidad de deformación del material debe ser suficiente para las deformaciones deseadas.

El forjado en matrices es un proceso realizado en caliente, considerando que el material base tiene una mayor temperatura que los troqueles, de manera que el material de éstos debe presentar alta resistencia a la temperatura. El flujo del material por la aplicación de la fuerza dentro del troquel se determina por:

- a) La resistencia del material al flujo y su capacidad de fluir.
- b) La fricción del material y los efectos de enfriamiento de la interfaz.
- c) La complejidad de la forma a ser forjada.

Se conoce que el cigüeñal tiene una geometría muy compleja por lo que se requiere que el diseño de la pieza a ser trabajada y el troquel estén de acuerdo con la capacidad de flujo del material y las fricciones que se generen, para obtener la geometría deseada.

Lubricación

Para el proceso de forja en caliente además de los efectos de lubricación, deben considerarse los efectos de transferencia de calor del material base a los troqueles. Ya que los factores de fricción, obtenidos bajo ciertas condiciones no son aplicables para otras. Por ejemplo un cierto lubricante en una prensa hidráulica no puede ser usado para una forja mecánica o de acuñado, incluso si las temperaturas de trabajo son las mismas.

Complejidad de la forma en forja

El diseño del proceso de forja debe garantizar el adecuado flujo del metal en los troqueles, de manera que se obtenga la geometría deseada de la pieza sin defectos internos o externos. Este flujo es influenciado por la geometría de la matriz de la pieza a forjar. A menudo se necesita varias operaciones para llegar del tocho inicial a la forma final más compleja.

En la figura 1.3 se puede observar una aproximación del troquel y el tocho para la fabricación de un cigüeñal de un motor de 4 cilindros, en ésta se distingue la diferencia entre la elevada complejidad del troquel y la simplicidad del tocho que van a ser utilizados. Teniendo esto en cuenta se debe establecer de manera adecuada la presión

y lubricación que se debe aplicar, conociendo el valor de fluidez del material, y la rugosidad de las superficies del tocho.

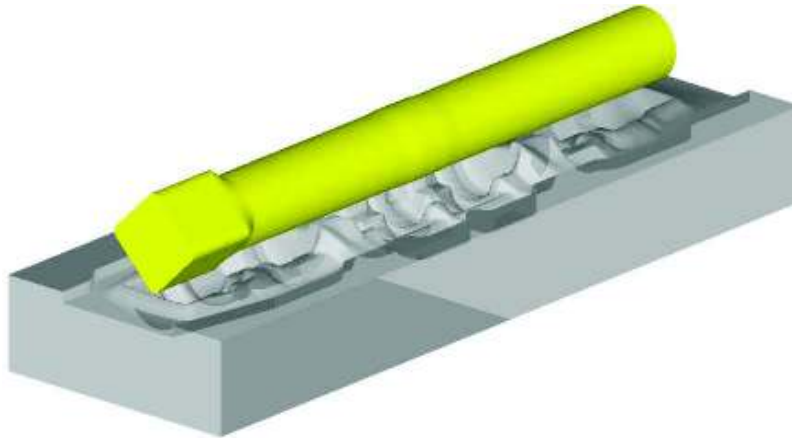


Figura 1.3. Matriz y tocho para un cigüeñal de un motor de 4 cilindros.
(Fuente Shamasundar, 2003)

Continuando el proceso que se observa en la figura 1.3 se tiene que al no cumplir los parámetros de lubricación, flujo y presión de manera adecuada habrá zonas donde el material no fluye de manera adecuada dentro de la matriz, generando fallas en el elemento como se puede observar en la figura 1.4.

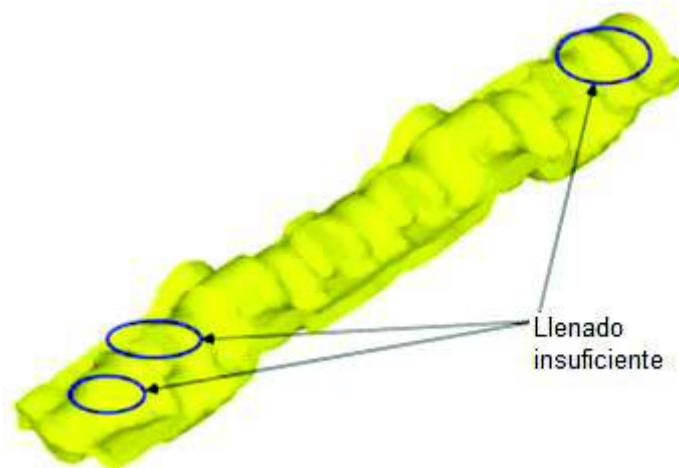


Figura 1.4. Fallas causadas por falta de flujo del material.
(Fuente Shamasundar, 2003)

En la figura 1.5 se observa un cigüeñal forjado, el cual no presenta fallas por presión, lubricación o flujo del material deficientes, por lo tanto se puede asumir que fueron correctamente establecidos para el proceso.



Figura 1.5. Cigüeñal fabricado mediante forja.
(Fuente Shamasundar, 2003)

Tratamiento térmico

Muchas de las piezas que son obtenidas mediante el proceso de forjado en caliente son usadas sin un proceso de tratamiento térmico adicional, ya que todos los elementos que se obtienen mediante este proceso reciben en cierta forma un tratamiento térmico. Si es necesario realizarlo, se recomienda hacerlo antes y después del mecanizado que se debe realizar para quitar las rebabas y restos de material dejados por el proceso, éste facilita el mecanizado y asegura que el elemento tenga una estructura uniforme.

El tratamiento térmico adicional que se debe realizar a los cigüeñales es aplicado en las áreas de rodamiento (muñequillas y muñones), mejorando así la resistencia a la fatiga y al desgaste en estos lugares. En la actualidad existen aceros microaleados para la fabricación de cigüeñales por forja en caliente que eliminan la necesidad de tratamientos térmicos adicionales.

Enderezar y acuar

Después de realizar un proceso de forja en caliente es normal que las secciones dentro del elemento tiendan a distorsionarse en cierta medida, esto debido a los cambios en las dimensiones de la geometría y al enfriamiento poco uniforme que puede darse dentro de la pieza.

Para eliminar estas distorsiones existen dos métodos que pueden ser empleados, martillar el elemento dentro de un dado especial mientras se va enfriando lo cual corrige estas distorsiones, o usar el método conocido como acuaración, que consiste en, una vez enfriada la pieza a la temperatura ambiente colocarla en una prensa potente y precisa, que ajusta el elemento al tamaño y forma deseados. Este proceso de acuaración elimina en forma parcial o total la necesidad de operaciones de mecanizado final.

Los aceros microaleados tienen mejores propiedades mecánicas, las cuales ayudan a reducir en forma considerable las distorsiones que puedan causarse dentro del elemento, lo cual reduce la necesidad de enderezamiento y aumenta la maquinabilidad del mismo.

1.1.3. Proceso de fundición:

Es un proceso de fabricación en el que un material en estado líquido ya sea metal, plástico o cualquier otro se introduce dentro de un molde, se deja solidificar dentro de éste y luego es extraído con la forma del elemento. Este proceso es útil para producir piezas que poseen una geometría compleja como los cigüeñales, que serían difíciles o muy caros de producir a partir del material sólido.

La fundición mediante modelado en arena se adapta a una amplia gama de aleaciones, formas, tamaños y cantidades de producción, al ser bastas las formas huecas que se pueden producir mediante el uso de estos moldes. La fundición con modelado en arena es el proceso más usado en la industria, algunas estimaciones dicen que cerca del 90% de fundiciones industriales se realizan mediante este método.

Arena verde

Se refiere a la mezcla de arena, arcilla y agua que se usa para crear el patrón hueco en el que se va a depositar el material fundido. Se debe mezclar la arena con la arcilla adecuada que funge como aglutinante de la mezcla y que se activa al colocar el agua, junto a otros aditivos. Esta mezcla se la empaqueta alrededor del molde del elemento a ser fundido, este molde no es una réplica exacta del elemento ya que se deben considerar ciertos parámetros físicos como la contracción térmica entre otros. Un ejemplo claro de en qué consiste y como se realiza un molde en arena verde se puede observar en la figura 1.6.

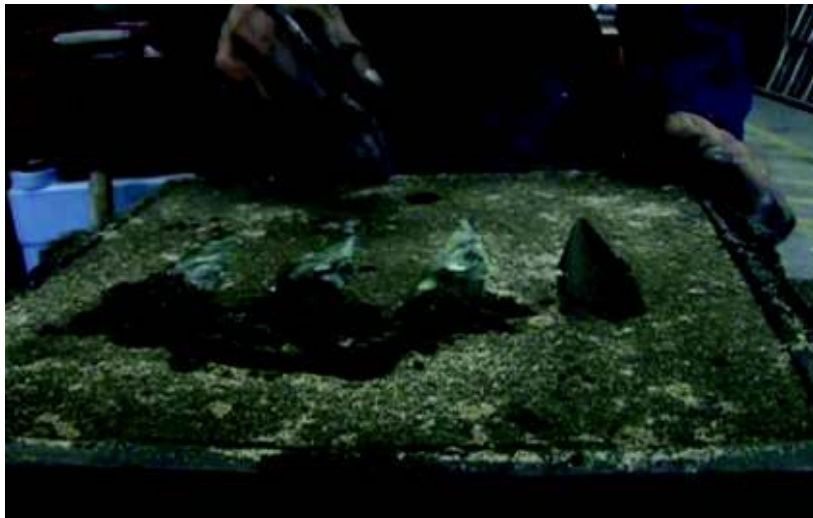


Figura 1.6. Molde en arena verde.
(Fuente EPN, 2010)

Se debe tener en cuenta que la arena tiene humedad, la cual se evapora en presencia del metal fundido, y si no se tiene un adecuado desfogue de estos gases se pueden producción imperfecciones o incluso dañar completamente el elemento. Esto causa que la exactitud geométrica y dimensional de una pieza fundida en arena sea limitada incluso en piezas pequeñas, y es poco común que se puedan lograr elementos con una precisión mayor de $\pm 0,5$ mm.

Arena seca

Para realizar el molde en arena seca se debe efectuar un secado del molde en arena verde en un horno, que ayuda a eliminar la humedad y a aumentar la resistencia. Con

esto se reduce la probabilidad de daños que se pueden producir por la formación de gases. El tiempo requerido de secado y la dificultad al tratar de mover grandes moldes sin dañarlos, hace que el proceso sea muy costoso en comparación de moldeo en arena verde y solo se lo usa en casos especiales en los cuales la formación de vapor por la humedad presenta un grave problema.

Secado superficial

Para obtener gran parte de los beneficios de la arena seca, sin la necesidad de realizar un secado en horno de todo el molde, se lo puede realizar a profundidades de una fracción de pulgada a una pulgada. Sometiendo a las caras del molde abierto a calor de antorcha, lámparas radiantes, aire caliente seco o radiadores eléctricos de resistencias, para formar una especie de piel seca alrededor de la cavidad el molde.

Los moldes con un secado superficial o de piel se pueden almacenar cerrados por cortos periodos de tiempo antes de ser vertidos, ya que el agua tiende a infiltrar esta superficie y volverla a humedecer. En la figura 1.7 se puede observar todos los elementos y el procedimiento de un proceso de fundición en arena.

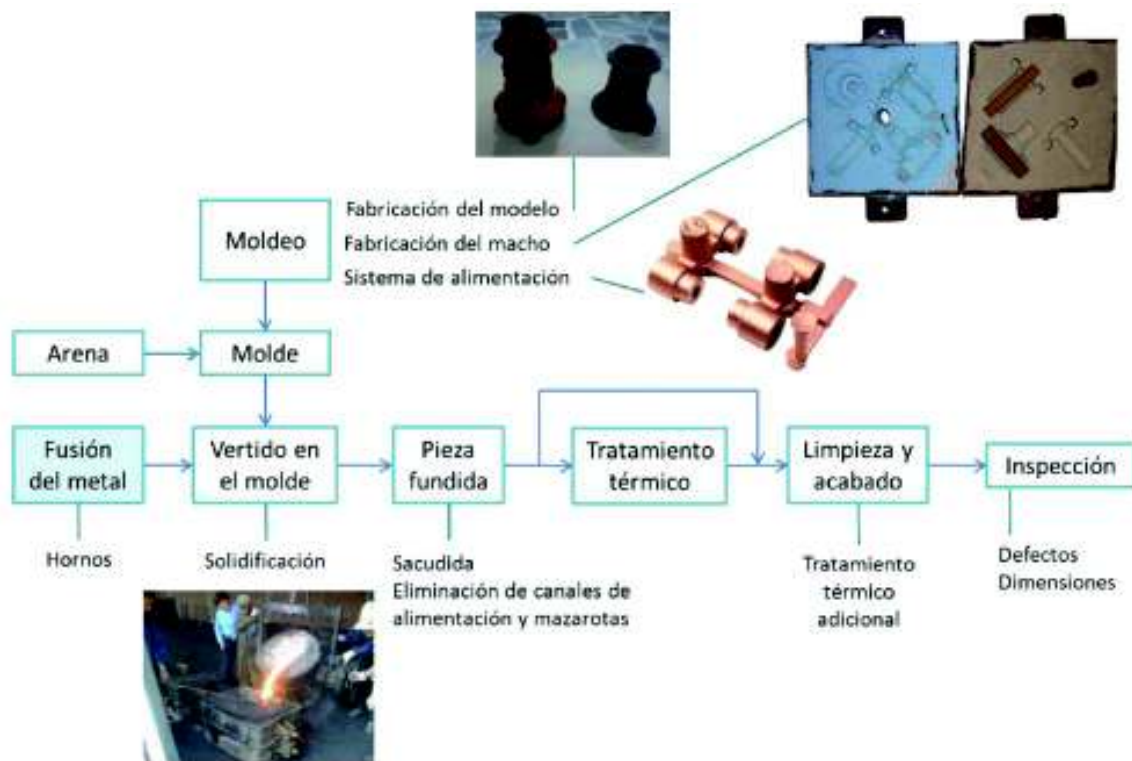


Figura 1.7. Esquema del proceso de fundición en arena verde.
(Fuente García C., 2016)

1.1.4. Comparación entre los procesos de forja y de fundición

Se dice que la fundición y la forja son procesos competitivos, incluso cuando son de diferentes materiales. Por lo general las herramientas y elementos utilizados en la forja

necesitan de una mayor inversión que los elementos para la fundición. Tal que la forja deba ser usada exclusivamente cuando las propiedades superiores del acero forjado sobre las del hierro o acero fundido sean necesarias para el elemento y correspondan a las del diseño.

Los productores siempre deben tener un cuidado especial en la selección e inspección de materias primas, ya que tanto en la forja como en la fundición si el elemento está conformado del material adecuado puede tener las propiedades idóneas para la aplicación solicitada, sin tener en cuenta la ventaja económica que pueda tener un proceso sobre el otro.

Algunas de las diferencias significativas entre la fundición y la forja son:

- Las fundiciones no pueden obtener las propiedades del trabajo en frío y caliente de las piezas forjadas, además la forja supera a la fundición en las propiedades de resistencia predecible lo que les da una mayor resistencia asegurada de manera consistente.
- En las fundiciones son muy comunes diferentes tipos de defectos. La forja en caliente refina el patrón del grano proporcionando alta resistencia, ductilidad y dureza por lo cual estos productos son más confiables, y no se incurre en costos posteriores de inspección más estrictos que la fundición si requiere.
- Las fundiciones requieren un control estricto tanto de la fusión como del enfriamiento del material ya que se puede producir la segregación de la aleación. Esto da como resultado que los tratamientos térmicos no sean uniforme lo cual puede afectar las dimensiones y forma de las piezas terminadas. Las piezas forjadas presentan una mejor susceptibilidad a los tratamientos térmicos por lo cual ofrecen una mejor estabilidad dimensional.
- Las piezas fundidas de rendimiento especial requieren de costosos elementos aleantes y controles de procesos más exhaustivos con lo cual se dan plazos de entrega más largos. El laminado abierto y laminado de anillos son algunos de los procesos de forja que se adaptan a varias longitudes de producción y permiten una entrega en tiempo reducido.
- Sin importar las ventajas mecánicas que poseen las piezas forjadas sobre las fundidas, éstas siempre serán una alternativa más económica, dependiendo de los requisitos de funcionalidad de la pieza, el volumen de producción entre otros.

Con todos estos datos se debe escoger el proceso de fabricación adecuado de acuerdo a las necesidades de producción y requerimientos mecánicos del elemento sin dejar de

lado las limitaciones que pueden ser de carácter económico o de acceso a materiales y maquinaria.

1.2. Condiciones de operación y fallo de los cigüeñales

Los cigüeñales por su compleja forma y sus cambios de sección tienen varios puntos que se consideran concentradores de esfuerzos, entre los cuales están las zonas de filetes (radios de acuerdo), de los muñones de bancada y muñequillas que conectan a las bielas. Estos sectores presentan cargas torsionales, de flexión y compresión, tal que son zonas donde se experimentan los esfuerzos críticos en el elemento y donde generalmente se producen las fallas. El tamaño y forma del cigüeñal depende de la cantidad de cilindros y la potencia del motor. El peso de un cigüeñal puede oscilar entre 3,2 kg para un motor de un solo cilindro y 12 HP, a unas 300 toneladas para un motor de 14 cilindros de 108320 HP.

La principal fuente de carga de los cigüeñales, es proporcionada por la presión que se genera en las cámaras de combustión, transmitida desde el pistón por la biela hasta la muñequilla de dicha biela. Otras cargas presentes se deben a la naturaleza dinámica del motor, éstas se pueden dar por vibraciones y desalineamiento de los componentes acoplados al cigüeñal y se presentan en forma de torsión y flexión.

Según Silva (2003) las causas de falla en los cigüeñales pueden ser tres:

- Ausencia de lubricación en el cárter o lubricación defectuosa, altas temperaturas del aceite en operación y exceso de revoluciones en el motor.
- Desajustes del cigüeñal en el montaje, cojinetes de tamaño incorrecto, que no haya control en el juego de cojinetes y bielas, y vibraciones del cigüeñal.
- Reparación inadecuada de los cilindros, alineación inadecuada del cigüeñal, rectificación inadecuada del desgaste normal de las piezas en fin defectos de reparación.

Otra falla común es la creación de grietas en los filetes, para identificar éstas grietas se utilizan diferentes criterios de falla, Spiteri (2005) por ejemplo estudió la relación de diferentes modos de falla como grietas superficiales, cambios de rigidez y fallas de dos sectores del cigüeñal, usando en su estudio cigüeñales laminados, dúctiles y de hierro fundido. Sometiéndolos a un análisis de flexión resonante probó que un cambio acelerado de la resonancia es un criterio de falla válido y los resultados tienen características similares con la falla en dos sectores. Un ejemplo de este estudio se presenta en la figura 1.8. Además de eso la resistencia a la fatiga obtenida a partir del

criterio de falla en dos sectores es significativamente mayor que la derivada del criterio de grietas superficiales.



Figura 1.8. Cigüeñal de un motor V-6, falla a una resonancia de 2 Hz, fractura de 9.5 mm.
(Fuente Spiteri, Lee, & Segar, 2005)

1.3. Método de elementos finitos (MEF)

Es un método numérico, similar al método de diferencias finitas, pero más general y eficaz para aplicaciones en el mundo real, que constan de complejas geometrías y variadas condiciones de borde. El MEF es una aproximación numérica que utiliza ecuaciones diferenciales parciales de las que se puede obtener una solución aproximada. Por su versatilidad en la ingeniería es usado en la resolución de problemas de análisis de esfuerzos, transferencia de calor, fluidos y electromagnetismo mediante una simulación por computadora.

La idea básica del MEF es dividir a la pieza en un número finito de elementos, donde los puntos de unión conocidos como nodos permitan obtener una solución aproximada del problema. La unión de los elementos finitos del sistema es conocida como malla, que se genera y se refina en los software. La división de la pieza en elementos más pequeños y simples se da ya que se puede representar una función compleja como un conjunto de ecuaciones simples, lo cual hace que sea posible para el software encontrar la solución aproximada del problema.

El ejemplo de la figura 1.9 muestra una placa con agujero, en la que se va a realizar un análisis de transferencia de calor por el MEF, para este estudio dicha placa va a ser dividida en elementos finitos triangulares creando una malla, a la que se le realizara un refinamiento, dejando listo el modelo para la aplicación del método de forma manual o con la ayuda de un software de simulación por elementos finitos.

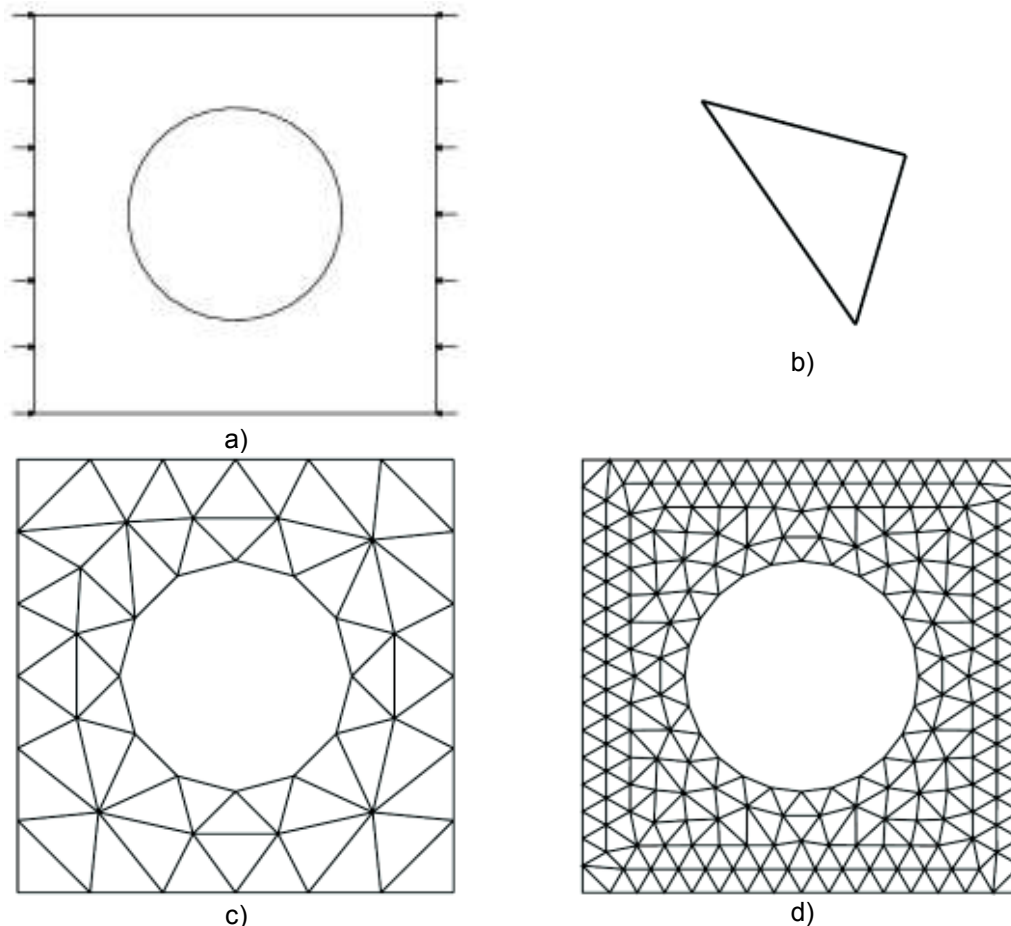


Figura 1.9. Ejemplo de elemento para el MEF a) placa agujero, b) elemento finito triangular, c) modelo de elementos finitos y d) modelo refinado de elementos finitos.
(Fuente Fish & Belytschko, 2007)

Para Reddy (2006), la división de una pieza en elementos finitos para su análisis tiene dos ventajas:

- Permite la representación precisa de geometrías complejas y la inclusión de las diferentes propiedades de los materiales.
- Facilita la representación de la solución total definida mediante las funciones al interior de cada elemento, permitiendo una captura local de resultados.

Reddy (2006) dice que para conseguir la solución de un problema por el MEF el software realiza tres pasos los cuales son:

- Dividir a la pieza de estudio en un número finito de partes (elementos), para representar la geometría y poder calcular la solución del problema.
- En cada elemento, buscar una solución aproximada mediante la combinación lineal de valores nodales y funciones de aproximación, y derivar las relaciones algebraicas entre los valores nodales para obtener la solución en cada elemento.
- Ensamblar los elementos y obtener la solución total del problema.

2. METODOLOGÍA

En este proyecto se realizó el análisis forense de dos cigüeñales, los cuales presentan una fractura completa en uno de sus brazos. Éstos pertenecen a un motor bóxer de cuatro cilindros de un vehículo Volkswagen Kombi de 1996, las fracturas que presentan tienen similares características, dadas en el brazo de unión entre la tercera muñequilla de biela y el muñón central del block, el análisis se va a realizar mediante fractografía y análisis de falla, con el apoyo de una simulación en software que utilizan el Método de Elementos Finitos (MEF), y de esta manera analizar el porqué de la fractura.

En esta sección se detalla en que se basan, cómo funcionan y que maquinaria es requerida para realizar los diferentes ensayos mecánicos y físicos, para obtener la fractografía y el análisis de la falla. Los ensayos realizados fueron: dureza, composición química, toma de macrografías, metalografías y microscopia electrónica de barrido. Además detalla en que consiste y como se realizó la simulación por MEF del elemento.

2.1. Análisis de composición química

Este análisis es muy importante ya que permite conocer los valores porcentuales de los elementos aleantes presentes en el material base, y con su análisis determinar cómo afecta su presencia a las propiedades mecánicas de éste, mediante la evaluación comparativa de los porcentajes presentes en el estudio con los valores referenciales establecidos en normativas. Para las fundiciones de hierro los principales elementos aleantes son carbono (C), manganeso (Mn), silicio (Si), cromo (Cr), níquel (Ni), molibdeno (Mo) y cobre (Cu).

2.1.1. Probetas usadas para análisis de composición química

Las dimensiones de las probetas son establecidas por las limitaciones que se tiene en la máquina en la cual se realiza el ensayo. Para este caso las dimensiones quedan especificadas en la figura 2.1.

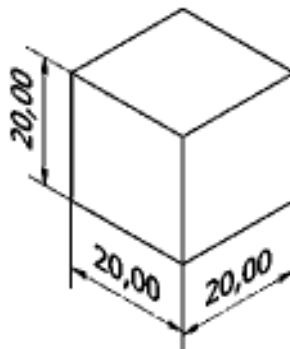



Figura 2.1. Dimensiones máximas para composición química (mm).
(Fuente Propia)

2.1.2. Equipo utilizado para análisis de composición química

Este ensayo fue realizado en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El análisis se lo realizó en un espectrómetro de chispa cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones espectrómetro de chispa.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Espectrómetro de chispa	
Marca	BRUKER	
Modelo	Q4 ION	
Frecuencia	50 / 1000 Hz	
Tiempo de descarga de chispa	10 μ s / 2 ms	
Sensor	CCD de alta resolución	
Peso	75 kg	
Software	Elemental Suite OES	

(Fuente Propia)

2.1.3. Procedimiento para análisis de composición química

El procedimiento que se emplea en el equipo de espectrometría por chispa o arco consiste en:

- Preparar la muestra cortándola y desbastándola para quitar de manera efectiva la mayoría de las impurezas así como pinturas y aceites.
- Colocar la muestra en el espectrómetro de chispa.
- Dejar que el equipo genere una chispa sobre la superficie de la muestra.
- La chispa calienta la superficie de la muestra y excita los átomos de todos los diferentes elementos presentes en esta.
- Los elementos al ser excitados emiten luz en diferentes longitudes de ondas.
- El haz de luz incide sobre el espectroscopio, y da el resultado de manera porcentual de los principales elementos aleantes del material.

2.2. Ensayo de dureza

La dureza es una capacidad superficial de los materiales, que consiste en la resistencia que presentan a ser indentado o rayado por un material más duro. De esta manera este ensayo consiste en conocer la resistencia que presenta un material a la indentación,

mediante la aplicación de fuerza sobre la superficie de éste con una punta (indentador), que está hecha de una aleación de mayor dureza, el equipo que se encuentra en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la EPN da los resultados en escala Rockwell, la cual tiene diferentes tipos detallados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Características del ensayo de dureza para escalas Rockwell.

Escala de dureza	Indentador	Precarga (kgf)
Rockwell A	Cono de diamante ángulo 120°	60
Rockwell B	Esfera de 1/16 in	100
Rockwell C	Cono de diamante ángulo 120°	150

(Fuente ASTM E18-16)

Por lo general para el uso y análisis de los datos obtenidos de dureza se debe realizar una transformación a una escala absoluta que para el caso del sistema internacional es la escala Brinell, esta transformación se la realiza con la ayuda de las tablas que se encuentran en la norma ASTM E140-12b.

2.2.1. Probetas usadas para el ensayo de dureza

En el ensayo de dureza no se tiene una probeta normalizada ni límites definidos en cuanto al tamaño de la probeta a utilizar, en este ensayo se va a utilizar las mismas probetas que para el examen metalográfico ya que éstas fueron cortadas y preparadas, dando como resultado que existan dos superficies opuestas paralelas, la cual es la única condición dimensional que deben cumplir las probetas para este ensayo. En la figura 2.2 se muestra las probetas a ser utilizadas en este análisis.

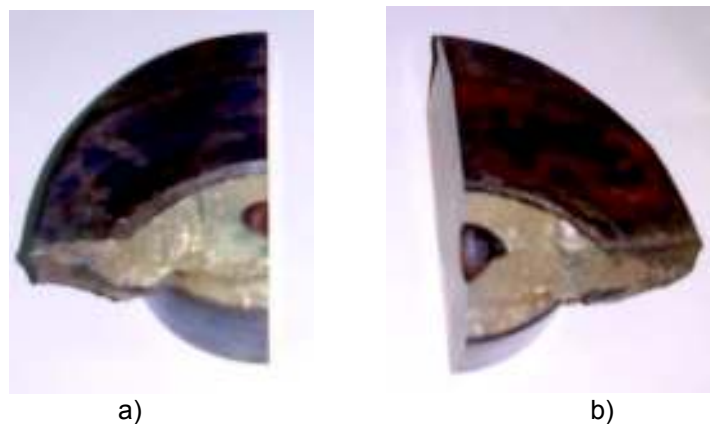


Figura 2.2. Muestras extraídas del material para análisis de dureza a) C-N, b) C-V.
(Fuente Propia)

2.2.2. Equipo utilizado para el ensayo de dureza

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en el durómetro marca Hardrocker A150 cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Especificaciones durómetro.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Durómetro Rockwell	
Marca	HARDROCKER	
Modelo	HR 150-A	
Rangos de carga	60, 100, 150 kgf	
Aplicación de la carga	Sistema hidráulico	
Indentador	HRA, HRB, HRC.	
Valor	Analógico	
Normativa	ASTM A 18-16	

(Fuente Propia)

2.2.3. Procedimiento para el ensayo de dureza

El procedimiento estandarizado del ensayo se lo detalla en la norma ASTM E18-16 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) y los pasos son los siguientes:

- Desbastar las dos superficies opuestas de contacto de la probeta de manera tal que queden paralelas.
- Seleccionar la escala de dureza en la que se va a llevar acabo el ensayo ya sea HRA, HRB o HRC, en base a las metalografías realizadas al elemento al determinar de qué material está conformado.
- Seleccionar el indentador adecuado para cada tipo de escala de dureza.
- Colocar la precarga adecuada para la escala en la que se requiera medir la dureza.
- Colocar la probeta sobre el soporte.
- Tocar la probeta con el indentador y proceder a encerrar la escala.
- Girar la perilla horizontal has que la aguja pequeña llegue vaya del punto rojo al negro.
- Cargar la máquina y esperar que la aguja se estabilice.
- Descargar la máquina y leer el valor marcado en la escala seleccionada donde apunta la aguja del medidor analógico.
- Realizar el procedimiento un mínimo de 5 veces para obtener esta cantidad de resultados de una misma superficie como sugiere la norma ASTM E18-16.

2.3. Macrografías

Es un proceso que se realiza a simple vista o con una baja amplificación, permitiendo observar las discontinuidades o defectos de los materiales. Se lo utiliza generalmente para evaluar la calidad de las superficies soldadas y para correlacionar las características de la superficie, con los mecanismos de falla en las zonas de fractura. Este proceso puede ser realizado como un ensayo no destructivo con poca preparación de la superficie (limpieza de la superficie) o como un ensayo destructivo cortando, maquinando y atacando el elemento.

2.3.1. Probetas usadas para las macrografías

Para la toma de macrografías se usó el elemento original sin ningún corte o maquinado, simplemente realizando una limpieza total en las superficies de fractura quitando todas las grasas, impurezas y óxidos que puedan existir en éstas, evitando así la aparición de indicios falsos en las macrografías. En la figura 2.3 se muestran los elementos una vez preparados para las macrografías.

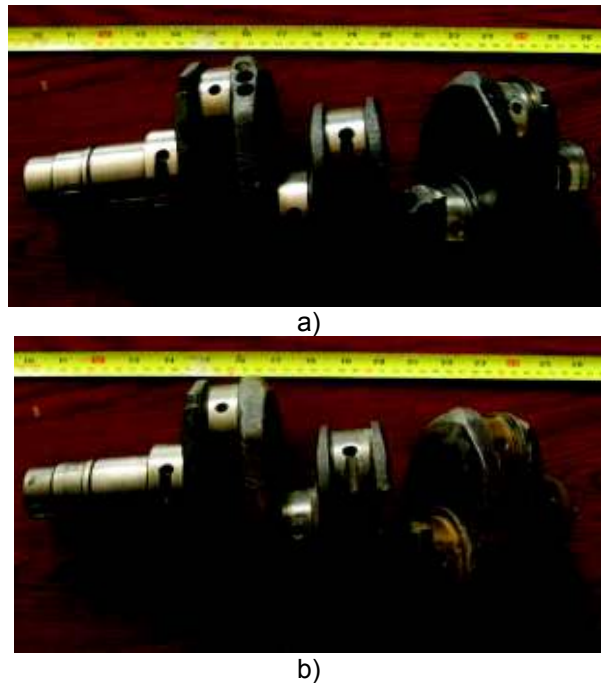


Figura 2.3. Cigüeñales para las macrografías, a) C-N, b) C-V.
(Fuente Propia)

2.3.2. Equipo utilizado para las macrografías

Las macrografías del elemento fueron realizadas en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en el microscopio estereoscópico marca Olympus cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones microscopio estereoscópico.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Estereomicroscopio trinocular con base articulada	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	SZX7	
Indicación de aumentos del zoom	Para 0.8X, 1X, 1.25X, 1.6X, 2X, 2.5X, 3.2X, 4X, 5X Y 5.6X.	
Movimiento	Ortogonal libre de 360°, con base de 13 x 12"	
Iluminación	Mediante fibra óptica, con guías de fibra óptica para iluminación de luz reflejada bifurcada	
Modelo de la cámara digital	SC30	
Software Metalográfico	Stream Essentials	

(Fuente Propia)

2.3.3. Procedimiento para la toma de macrografías

Para el procedimiento de este ensayo se puede usar como guía la norma ASTM E381-17 (Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings) que da una guía de cómo se puede proceder para realizar el ensayo. Los pasos que se siguieron para el ensayo son:

- Ubicar las superficies de falla del elemento.
- Realizar una limpieza con gasolina para eliminar aceites y grasas de las superficies de falla al igual que del resto de superficies del elemento.
- Continuar la limpieza con jabón para eliminar los restos de gasolina y eliminar impurezas que la gasolina no haya retirado.
- Proceder a limpiar las superficies de falla con un líquido desoxidante que sea capaz de retirar todos los óxidos presentes en las superficies.
- Para finalizar se le realiza una limpieza con jabón para retirar los restos de desoxidante de la superficie. Todos los procesos de limpieza se los debe realizar con cepillos plásticos que no puedan crear nuevas marcas en la superficie de falla, ni rayar o destruir las ya existentes para no provocar que en las metalografías existan falsos indicios.
- Se procede a colocar alcohol sobre las supervise de falla, ayudando a realizar el secado con una corriente de aire y evitando que la oxidación reaparezca.

- Se lleva los elementos al microscopio estereoscópico, para proceder a hacer un barrido superficial con los diferentes aumentos e identificar los diferentes indicios de falla.
- En las ubicaciones de los indicios de la falla se procede a tomar las fotografías de los mismos en el aumento adecuado.
- Una vez ya con estas fotografías se puede proceder a realizar el análisis respectivo.

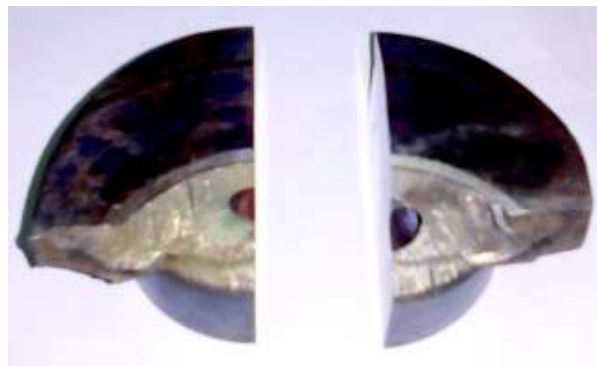
2.4. Ensayos metalográficos

Este ensayo permite determinar las características microestructurales que están relacionadas con propiedades físicas y químicas intrínsecas del material, mediante equipos ópticos de amplificación de imágenes en probetas de elementos metálicos. También se puede observar si el material tiene discontinuidades significativas para el análisis y la calidad del material con el cual se fabricó el elemento.

Para las fundiciones nodulares se puede observar la cantidad y calidad de nódulos de grafito presentes en el material, pudiendo estimar de qué material se trata y dar un valor aproximado de gran parte de las propiedades físicas del mismo. Luego del ataque químico permite determinar en qué fase se encuentra el hierro aleado con el carbono ya sea esta ferrítica o perlítica, ayudando a identificar qué tipo de fundición nodular es la que se está ensayando.

2.4.1. Probetas usadas para el ensayo metalográfico

Las probetas utilizadas en este ensayo no tienen ninguna restricción en tamaño o forma, las condiciones vienen dadas por las capacidades de los equipos y la posibilidad de maniobrar con estos elementos para realizar los ensayos. Tal que en elementos de grandes dimensiones se procede a extraer una muestra representativa. De esta manera para el análisis de los dos cigüeñales se procedió a realizar un corte axial y luego un corte longitudinal obteniendo las probetas de la figura 2.4.



a)



b)

Figura 2.4. Probetas para los ensayos metalográficos. a) C-N, b) C-V.
(Fuente Propia)

2.4.2. Equipo utilizado para el ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico del elemento se lo realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, con la ayuda de diferentes equipos para la preparación y posterior análisis del elemento. Las maquinas que principalmente intervinieron en la preparación del elemento son: cortadora axial de disco, desbastadora de disco, mesa de desbaste fino y pulidora de paño. Mientras que para la toma de las metalografías se usó el microscopio metalográfico con su software respectivo.

Cortadora axial de disco

Reduce el tiempo y esfuerzo necesarios para realizar los cortes en los elementos a ser analizados. Para este caso se realizaron dos cortes en cada elemento para extraer las probetas deseadas. Las características se detallan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones cortadora axial de disco.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Cortadora axial de disco	
Marca	W. J. Savage	
Modelo	SN-10 10T66-199	
Potencia del motor	10 HP	
Diámetro del disco de corte	16 inch	
Medio de enfriamiento	Agua	
Voltaje	240 V	

(Fuente Propia)

Desbastadora de disco

Permite realizar el desbaste o pulido grueso de los elementos igualando las superficies y quitando las limaduras y rebabas dejadas por el proceso de corte. Las características se detallan en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Especificaciones desbastadora de disco.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Desbastadora de disco	
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-0M-84	
Potencia del motor	1 HP	
Voltaje	110 V	
Abrasivo	Lija # 80 (80 granos por pulgada)	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente Propia)

Banco de desbaste fino

Permite realizar un desbaste con lijas de diferentes medidas con lo cual se obtiene una superficie lisa y sin marcas profundas que no puedan ser eliminadas mediante el pulido. Las características se detallan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Especificaciones banco de desbaste fino.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Banco de pulido	
Marca	BUEHLER	
Modelo	39-1470-AB	
Abrasivo	Lijas # 240, 320, 400, 600, 800, 1000 y 1500	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente Propia)

Pulidora de paño

Se realiza un proceso manual de pulido, en el cual la sujeción y la presión de la probeta sobre el paño se dan de manera manual por el operador. El pulido se lo puede realizar tanto solo en agua, como en una solución acuosa de alúmina lo cual permite eliminar

todas las líneas y marcas que quedaron del proceso de desbaste fino en las lijas. Este proceso se lo realiza hasta tener una superficie completamente lisa para poder tomar las metalografías del elemento. Las características se detallan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Especificaciones pulidora de paño.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Pulidora de paño	
Marca	BUEHLER	
Modelo	115-RM-1850	
Potencia del motor	1 HP	
Voltaje	110 V	
Abrasivo	Pulido grueso: Alúmina de 1 micrón. Pulido fino: Alúmina de 0,3 micrón	
Medio de enfriamiento	Agua.	

(Fuente Propia)

Microscopio metalográfico

Es un equipo que permite observar en primer lugar las probetas sin ataque químico para identificar las discontinuidades, y la forma y cantidad porcentual de los nódulos de grafito en éstas, posterior al ataque químico se va a observar la microestructura y las diferentes fases del hierro. Las características se detallan en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Especificaciones microscopio metalográfico.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Microscopio metalográfico invertido trinocular	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41	
Lente	Tubo infinito f>200 mm	
Objetivos	E5x E10x E50x E100x	
Platina mecánica	Desplazamiento en X y Y con rango de movimiento: x=120mm, y=78mm	
Modelo de la cámara digital	SC30	
Software	Stream Essentials	

(Fuente Propia)

2.4.3. Procedimiento para el ensayo metalográfico

El proceso para este ensayo se divide en dos secciones las cuales son: corte y preparación de la probeta, y análisis de metalográficos.

Corte y preparación de las probetas

- Se procede a colocar el cigüeñal en la prensa de sujeción de la cortadora axial de disco, de manera tal que se pueda realizar un corte parcial en la parte superior de la superficie de falla en sentido longitudinal al eje de giro del cigüeñal. Al poseer un sistema de enfriamiento por agua no se corre el riesgo de sobrecalentar el elemento y así cambiar su microestructura en el corte.
- Después de proceder con el corte parcial hasta el contrapeso, se procede a colocar el elemento para el corte axial y poder extraer las dos probetas que se tiene de la zona de falla.
- Posterior a finalizar el corte se tendrá cuatro probetas (dos de cada cigüeñal), procediendo con éstas a realizar el desbaste grueso con una lija metálica N° 100 (100 granos/in²) en la desbastadora de disco. Perdiendo todas las imperfecciones causadas por los cortes.
- Se realiza un desbaste fino con las lijas metálicas N°240, N°320, N°400, N°600, N°800, N°1000 y N°1500, en orden ascendente en la mesa de desbaste, yendo de la más gruesa a la más fina. Esto elimina las marcas dejadas por el desbaste grueso realizado anteriormente.
- Se coloca alcohol sobre las superficies desbastadas para eliminar el agua y evitar la oxidación debido a la evaporación de ésta, que se usó como refrigerante en el proceso de desbaste fino.
- Subsiguiente a esto se procede a pulir las probetas usando como pulimento solución acuosa de alúmina en la pulidora de paños. El pulido se lo realiza hasta eliminar todas las marcas dejadas por el desbaste fino, revisando el avance cada cierto tiempo en el microscopio metalográfico.
- Al finalizar el proceso de pulido se le coloca alcohol sobre la superficie para evitar la oxidación del elemento.

Análisis de metalográficos

- En el microscopio metalográfico se procede a tomar micrografías de las zonas pulidas a un aumento de 100X, de zonas representativas del elemento donde se pueda observar los nódulos de grafito y las discontinuidades presentes en la microestructura del elemento.

- Posteriormente a esto se realiza un ataque químico por sumergimiento con una solución de Nital al 10%, hasta lograr que la superficie pulida de la probeta pierda su brillo determinando que el ataque está completo.
- Al finalizar el ataque químico se procede a tomar las micrografías con el microscopio metalográfico, observando la matriz de hierro y sus límites de grano junto con los nódulos de grafito en la superficie.
- Estas imágenes se analizan de manera cualitativa comparándolas con las que se encuentran en los handbooks especializados y en las normas. Una ayuda que brinda el software “Stream Essentials” propio del microscopio, es el poder analizar tanto la nodularidad como el porcentaje de perlita y ferrita presente en el elemento. Lo que va a ser analizado y comparado con el análisis aquí realizado.

2.5. Microscopia electrónica de barrido

Permite mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), tomar fotografías en tres dimensiones de las superficies de las probetas a analizar para cualquier tipo de material, ya sea éste orgánico o inorgánico. Para el caso de la ingeniería mecánica este procedimiento se puede usar en el análisis de los metales, cerámicos y plásticos, de manera tal que tiene una infinidad de aplicaciones.

En el análisis de falla este ensayo ayuda a determinar tanto las propiedades físicas del elemento, como a detectar fisuras y grietas que no son observables en las macrografías dentro de las superficies analizadas, la determinación de la microestructura se la puede realizar sin la necesidad de un pulido exhaustivo de la superficie de la probeta, que si es necesaria en las tomas con el microscopio metalográfico.

2.5.1. Probetas usadas para la microscopia electrónica de barrido

Las probetas de este análisis deben tener dimensiones máximas de 35 mm de diámetro o espesor y 150 mm de largo ya que el equipo que se va a usar en este ensayo no tiene el espacio requerido para usar probetas de mayor tamaño. En la figura 2.5 se pueden observar las probetas utilizadas para este análisis.



a)



b)

Figura 2.5. Probetas para la microscopia electrónica de barrido. a) C-N, b) C-V.
(Fuente Propia)

2.5.2. Equipo utilizado para la microscopia electrónica de barrido

La microscopia electrónica de barrido se la realizó en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en el microscopio electrónico de barrido marca ASPEX cuyas especificaciones se detallan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Especificaciones microscopio electrónico de barrido.

Característica	Especificación	Equipo
Equipo	Microscopio electrónico de barrido SEM	
Marca	ASPEX	
Modelo	PSEM eXpress	
Resolución de imagen	25 nm	
Rango de detección	100 nm – 5 mm	
Presión variable	0,15 y 0,3 Torr	
Voltaje de aceleración de electrones	20 – 2 kV	
Rango de movimiento	80 x 100 mm XY	
Software	Perception 2	

(Fuente Propia)

2.5.3. Procedimiento para la microscopia electrónica de barrido

El procedimiento para realizar el ensayo en el microscopio electrónico de barrido ASPEX PSEM eXpress es:

- Cortar las probetas a las dimensiones establecidas para el ensayo.
- Preparar las superficies de falla de las probetas.
- Colocar la muestra en la cámara extraíble del equipo.
- Realizar el análisis de las superficies e ir identificando las imágenes necesarias para realizar el análisis.
- Realizar las magnificaciones necesarias para tomar las fotografías necesarias de la muestra para el análisis.

2.6. Análisis por elementos finitos mediante MEF

Para el MEF en software se empieza con la creación de un modelo CAD (Computer-Aided Design) diseño asistido por computadora, para este proyecto el modelo fue creado en el software Autodesk Inventor a partir de dimensiones reales tomadas manualmente del cigüeñal y aproximaciones de las que no pueden ser tomadas de manera exacta. Este modelo aproximado va a permitir simular el efecto de la fuerza calculada en el ANEXO 2 que actúa sobre el cigüeñal, colocando las restricciones y condiciones que se consideren necesarias para analizar el posible escenario de falla.

Los software que fueron utilizados en la simulación y análisis de las condiciones de falla son: Autodesk Inventor y ANSYS Multiphysics. Siendo éstos, software que han sido ampliamente probados y usados en diversas aplicaciones mecánicas, que con un adecuado control en los variables de entrada (restricciones y condiciones), y una eficiente creación de la malla arrojan resultados coherentes y que resultan de alta confiabilidad para el análisis.

2.6.1. Creación del modelo CAD

Los pasos para crear el modelo CAD del cigüeñal son los siguientes:

- Seleccionar una base del cigüeñal como punto inicial del dibujo.
- Medir todas las secciones representativas de la base de manera tal que sea posible dibujar todas sus aristas.
- Dibujar en el software Autodesk Inventor la base seleccionada para poder usarla como punto de referencia para la creación de las partes remanentes del elemento.
- Tomar las mediciones del remanente al mismo tiempo que se va creando el modelo en el software, hasta terminar de recrear el cigüeñal completo.

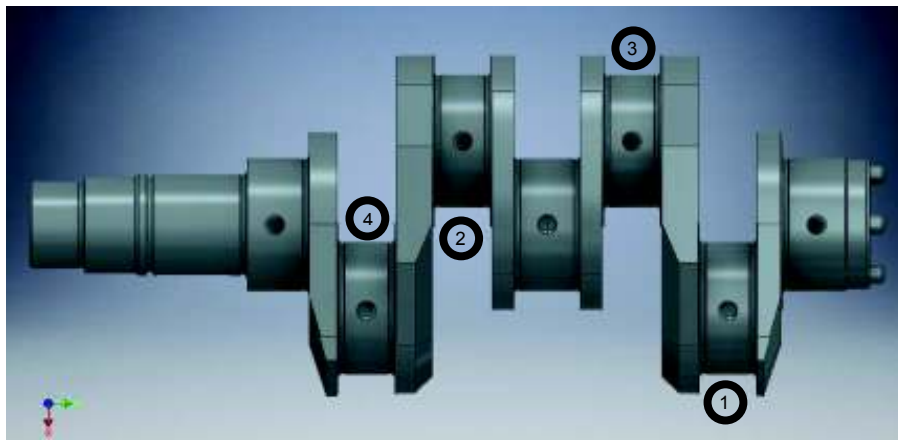


Figura 2.6. Modelo de cigüeñal.
(Fuente Propia)

El modelo creado en el software es un aproximado bastante preciso del cigüeñal real tomado como base, ya que al no tener los implementos adecuados de medición existen zonas donde por la geometría del elemento es imposible recrearlo a la perfección. En la figura 2.6 se puede observar el modelo creado en el software Autodesk Inventor.

2.6.2. Determinación de propiedades básicas y creación de la malla sobre el modelo CAD

Las propiedades básicas sobre las que se basa cualquier simulación de esfuerzos mediante uno u otro software son similares, para el caso específico de un análisis de esfuerzos mecánicos en un elemento metálico de una máquina se requiere: coeficiente de Poisson, módulo de Young o elasticidad y la densidad del material a ser procesado. Las que permiten realizar la simulación de esfuerzos mecánicos y pueden ser reemplazadas fácilmente para los diferentes materiales que se quiera analizar en el modelo. En este caso se usaron las propiedades del hierro nodular o dúctil ASTM A 536 Grado 80-55-06 detalladas en el Metals Handbook ASM (ASM International, 2005) y que muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Propiedades para la simulación.

Parámetro	Valor
Coeficiente de Poisson	0,31
Módulo de Young	168 GPa
Densidad	7,15 gr/cm ³

(Fuente ASM International, 2005)

La generación o creación de la malla tiene un proceso diferente en cada uno de los software que se pueden utilizar, no obstante su forma y características son similares por lo cual se puede dar unos lineamientos importantes a tomar en cuenta el momento de realizar este procedimiento.

- La malla determina el número de elementos finitos en los cuales se va a dividir el modelo CAD, para lo cual se debe considerar la capacidad de procesamiento del ordenador, ya que el software realiza varios cálculos para cada uno de los nodos de los elementos.
- Se debe realizar una malla acorde a las necesidades del programador, de las zonas críticas del elemento y de los resultados que se necesiten obtener.
- La malla debe tener un crecimiento paulatino de los elementos de manera tal que no se creen discrepancias grandes de tamaño entre elementos contiguos.
- Los software generalmente crean por sí mismo una malla para el análisis del modelo, la que puede ser refinada y adecuada por el programador para obtener los resultados más acordes a las necesidades de solución establecidas.

En la figura 2.7 se observa como en el caso del ANSYS el software crea un mallado bastante grueso, el cual puede ser refinado a fin de tener un crecimiento paulatino de los elementos, para el caso del Inventor en la figura 2.8 se puede apreciar como en la malla es un poco más fina y tiene un mejor refinamiento, aunque igualmente merece la pena hacerle unas pequeñas modificaciones.

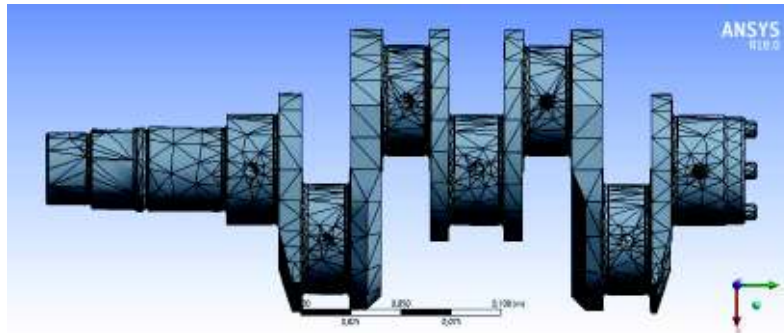


Figura 2.7. Malla automática generada en ANSYS.
(Fuente Propia)



Figura 2.8. Malla automática generada en Inventor.
(Fuente Propia)

Para realizar un análisis más preciso se realizó un refinamiento en la malla para ambos programas como se observa en la figura 2.9 en ANSYS se realizó un refinamiento dimensional para que el software pueda realizar la curva de convergencia ya que con otro tipo de refinamiento no era posible crear la curva, y para el Inventor se realizó un refinamiento en las superficies más pequeñas como se muestra en la figura 2.10 obteniendo un mallado más fino.

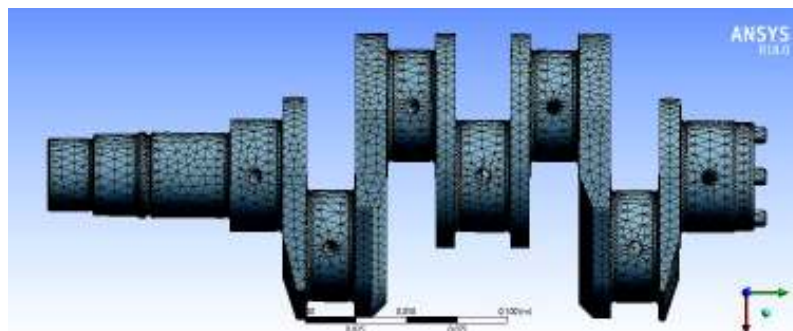


Figura 2.9. Malla refinada generada en ANSYS.
(Fuente Propia)



Figura 2.10. Malla refinada generada en Inventor.
(Fuente Propia)

2.6.3. Apoyos y cargas que van a ser usados en el proceso de simulación

Para este tipo de cigüeñales se tiene tres puntos de apoyo, como se observa en la figura 2.11, estos son los puntos donde el cigüeñal mediante cojinetes de rodamiento se une con el block del motor. Se muestra también como debe realizarse el ensamble de los diferentes componentes que van acoplados al cigüeñal siendo los más importantes la polea cigüeñal, el volante motor y la biela.

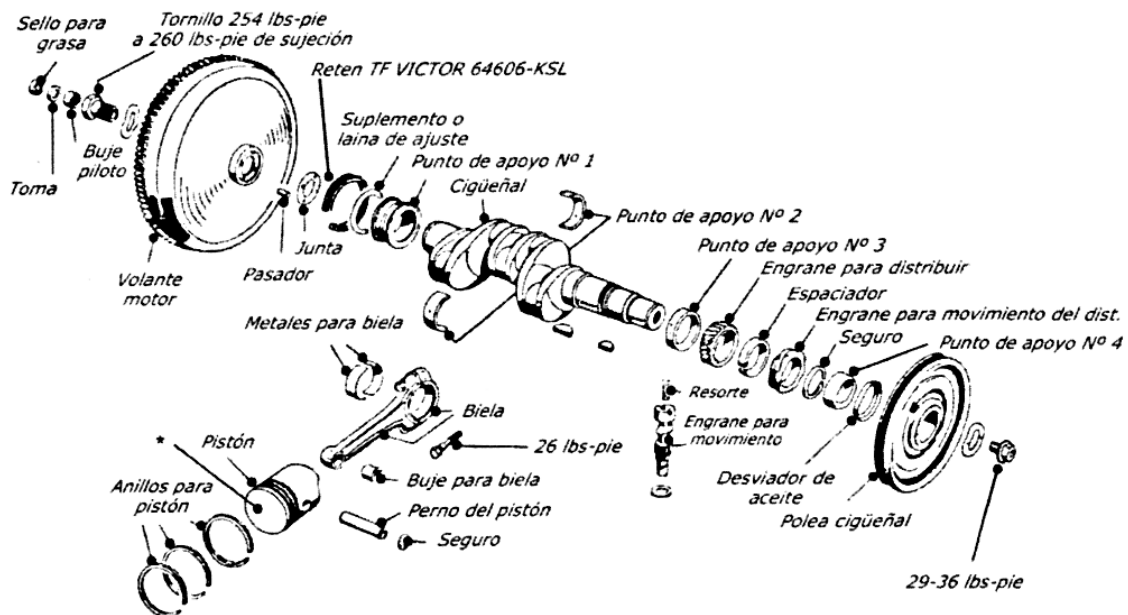


Figura 2.11. Detalle de ensamble del cigüeñal para motor bóxer de Volkswagen Kombi.
(Fuente Volkswagen, 1988)

En la figura 2.12 se observa la distribución de los pistones y las bielas sobre el cigüeñal, mostrando que los pesos de estos elementos no actúan directamente sobre el cigüeñal ya que al ser componentes de un motor bóxer están ubicados horizontalmente, por esto dichas cargas no son tomadas en cuenta para el análisis. La fuerza generada por la presión máxima que se genera en la cámara de combustión del tercer cilindro del motor es la única carga que tuvo en cuenta para el análisis, despreciando las fuerzas generadas por efecto de las presiones menores que ocurren en el resto de cilindros

debido a que éstas son ínfimas en comparación con la presión máxima que se genera el momento de la explosión de los gases en la cámara de combustión del tercer cilindro.



Figura 2.12. Distribución de las bielas y pistones en el cigüeñal.
(Fuente Garcia, 2013)

Para el análisis MEF se asumió que el cigüeñal el momento de la fractura no poseía movimiento, restringiendo mediante acoples fijos los lugares de acople de la polea cigüeñal y el volante motor, esto debido a que el motor creó una fuerza en contra del movimiento del cigüeñal que fungió como freno, lo cual detuvo el funcionamiento normal del elemento y provocó que la fuerza generada por la presión de los gases de combustión del tercer cilindro se trasladara por la biela y se aplicara directamente sobre el cigüeñal lo que produjo la fractura. Estos supuestos se toman debido al tipo de falla que se presenta en ambos cigüeñales que es una fractura frágil sin rastros de fluencia o falla a fatiga.

En el análisis en ANSYS se colocaron las cargas, restricciones y apoyos que son requeridos para la simulación de este caso de estudio en concreto como se observa en la figura 2.13. Considerando que la hipótesis de cargas antes mencionada es correcta.

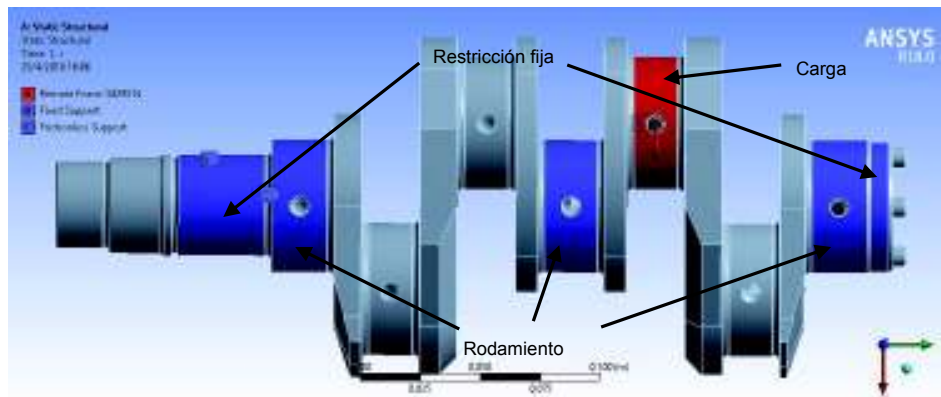


Figura 2.13. Posición de la fuerza y las restricciones ANSYS.
(Fuente Propia)

Igualmente para el análisis en Inventor se coloca las cargas, restricciones y apoyos como se observa en la figura 2.14, en esta se ve que el inventor no marca donde están las restricciones pero si muestra donde y como se aplica la carga.

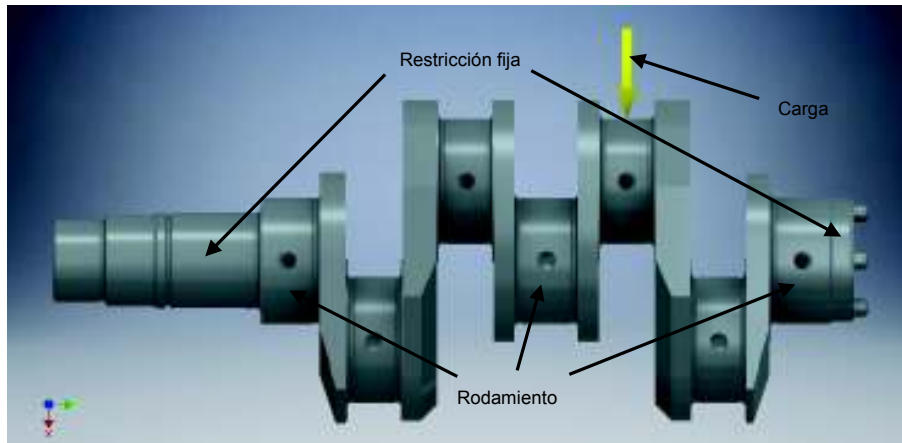


Figura 2.14. Posición de la fuerza y las restricciones Inventor.
(Fuente Propia)

Datos de tamaño y peso de la biela como del pistón se tomaron de componentes del motor conseguidos del lugar donde se realizó el reemplazó del cigüeñal. De los cuales para el análisis solo se tendrá en cuenta las dimensiones de dichos elementos, ya que son necesarias para el cálculo de la presión y la fuerza que se genera en la cámara de combustión. Los elementos se pueden observar en la figura 2.15, y la medición de sus pesos en la figura 2.16.



Figura 2.15. Pistón y biela para un motor de un Volkswagen Kombi.
(Fuente Propia)



a) b)
Figura 2.16. Pesos pistón y biela para un motor de un Volkswagen Kombi, a) Pistón, b) Biela.
(Fuente Propia)

La carga que se aplica en la simulación es de 34293 N, ésta se obtiene calculando mediante el análisis termodinámico del ciclo Otto (Cengel & Boles, 2009), la presión máxima a la cual se llega en la cámara de combustión, y dividiendo ésta para el área del pistón, como se puede observar en el ANEXO 2.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos, análisis y simulaciones, realizados para la caracterización del material y el análisis de la fractura, mediante el estudio de las macro y micrográficas, se compara los valores del ensayo de dureza y composición química con los referenciados en normas técnicas, y se confrontan las soluciones de la simulación con los productos de los cálculos realizados.

Los cigüeñales van a ser identificados mediante los nombres “C-V” y “C-N” siendo C-V el elemento que se encontraba dentro del motor del vehículo, y C-N el que reemplazó al C-V cuando se produjo la fractura en éste, ambos cigüeñales para el análisis fueron facilitados por el propietario del vehículo.

El tiempo de operación que tuvieron los dos cigüeñales fue de aproximadamente dos meses, esto desde la compra del vehículo por el actual propietario, a él se le había informado que el cigüeñal había sido reemplazado recientemente en el motor, por lo cual se puede estimar que el cigüeñal C-V tenía menos de un año de uso. Un dato que se debe considerar es que ninguno de los dos elementos es original para el vehículo Volkswagen y no se tiene información relevante de los procesos ni materiales que se emplearon en su fabricación.

3.1. Resultados

3.1.1. Ensayo de composición química

En la tabla 3.1 se exponen los resultados del ensayo realizado en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. En el ANEXO 1 se muestra el informe completo del ensayo.

Tabla 3.1. Valores del ensayo de composición química.

Material	C-V (%)	C-N (%)
Carbono	3,841	3,586
Silicio	2,656	2,875
Manganeso	0,288	0,421
Fósforo	0,037	0,033
Azufre	0,0047	0,0053
Cromo	0,087	0,196
Níquel	0,038	0,052
Cobre	0,0086	0,01
Aluminio	0,013	0,007
Cobalto	0,0077	0,0075
Magnesio	0,033	0,041
Titanio	0,013	0,012
Hierro	92,97	92,74

(Fuente DEMEX)

3.1.2. Ensayo de dureza

Los resultados obtenidos en el durómetro Hardrocker en escala Rockwell B son convertidos a escala Brinell usando la norma ASTM E140-12b. Los valores quedan tabulados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de dureza.

Dureza			
C-V		C-N	
Rockwell B	Brinell	Rockwell B	Brinell
91	190	90	185
92	195	89	180
93	200	87	172
91	190	88	176
89	180	88	176

(Fuente Propia)

3.1.3. Macrografías de los cigüeñales

Las fotografías de las tomas macrográficas de los cigüeñales que se obtuvieron con ayuda del estereomicroscopio se las presenta en esta sección bajo los nombres ya establecidos para cada uno de los cigüeñales.

Macrografías del cigüeñal C-V

En la figura 3.1 se pueden observar las marcas dejadas por el proceso de maquinado de los radios de acuerdo.

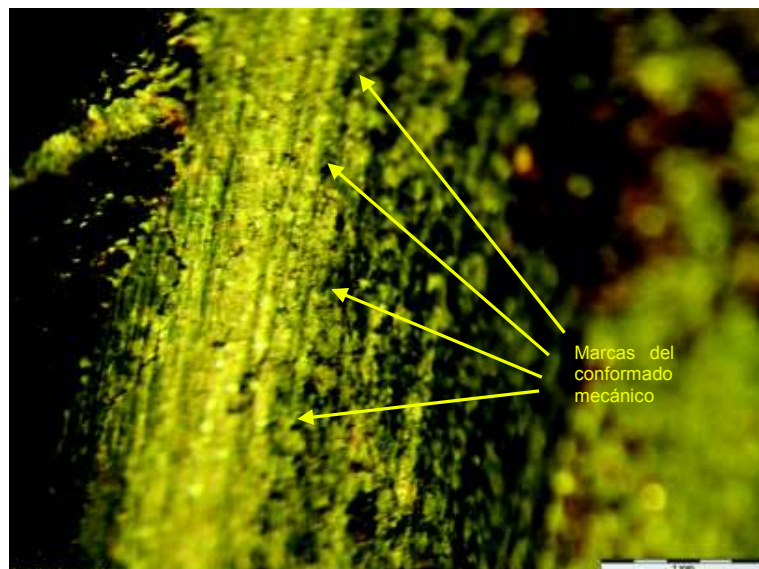


Figura 3.1. Marcas del maquinado del cigüeñal, 28X.

(Fuente Propia)

La figura 3.2 muestra las marcas de río que se presentan sobre la superficie de fractura las cuales están dirigidas de un extremo al otro de la misma e indican que el tipo de falla que se tiene en el elemento es frágil.

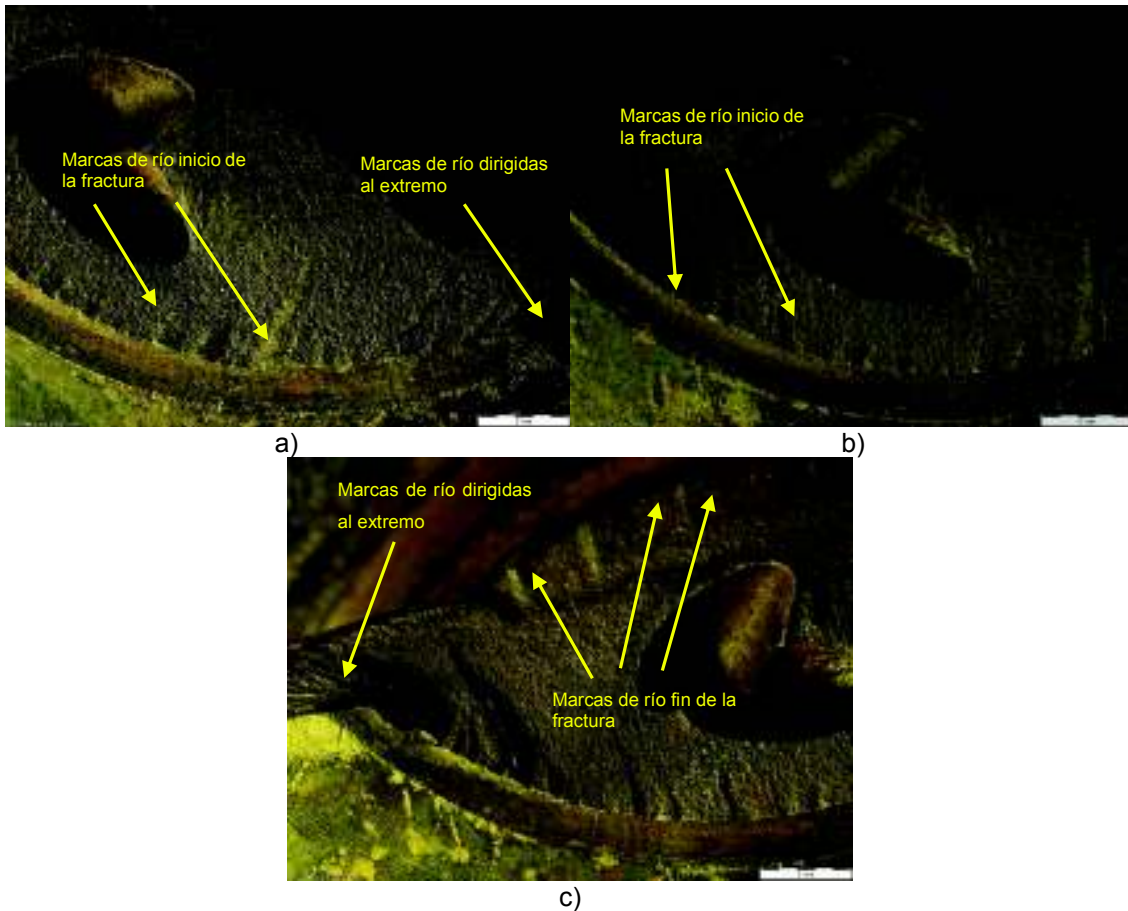


Figura 3.2. Marcas de río en la superficie de fractura, a)4X, b)4X, c)4X.
(Fuente Propia)

Se puede observar en la figura 3.3 las marcas del mecanizado aplicado al elemento, donde se muestra una fisura que se propagan siguiendo estas marcas.

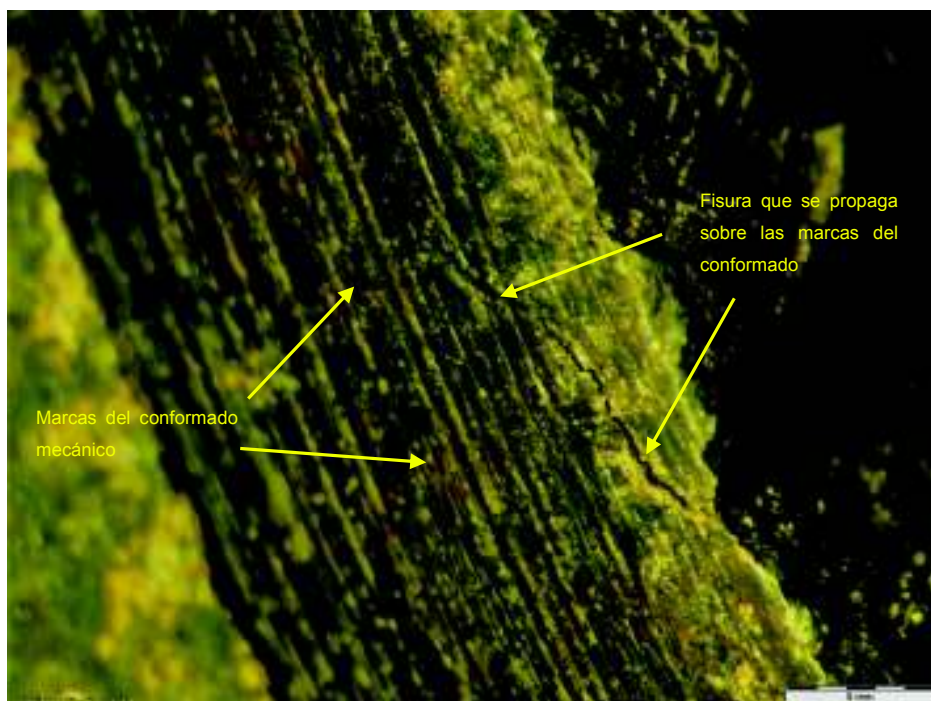


Figura 3.3. Marcas del maquinado y fisura propagada por estas, 28X.
(Fuente propia)

Se muestra en la figura 3.4 un sector de la superficie de fractura donde se observa los nódulos de grafito de un tamaño considerable.

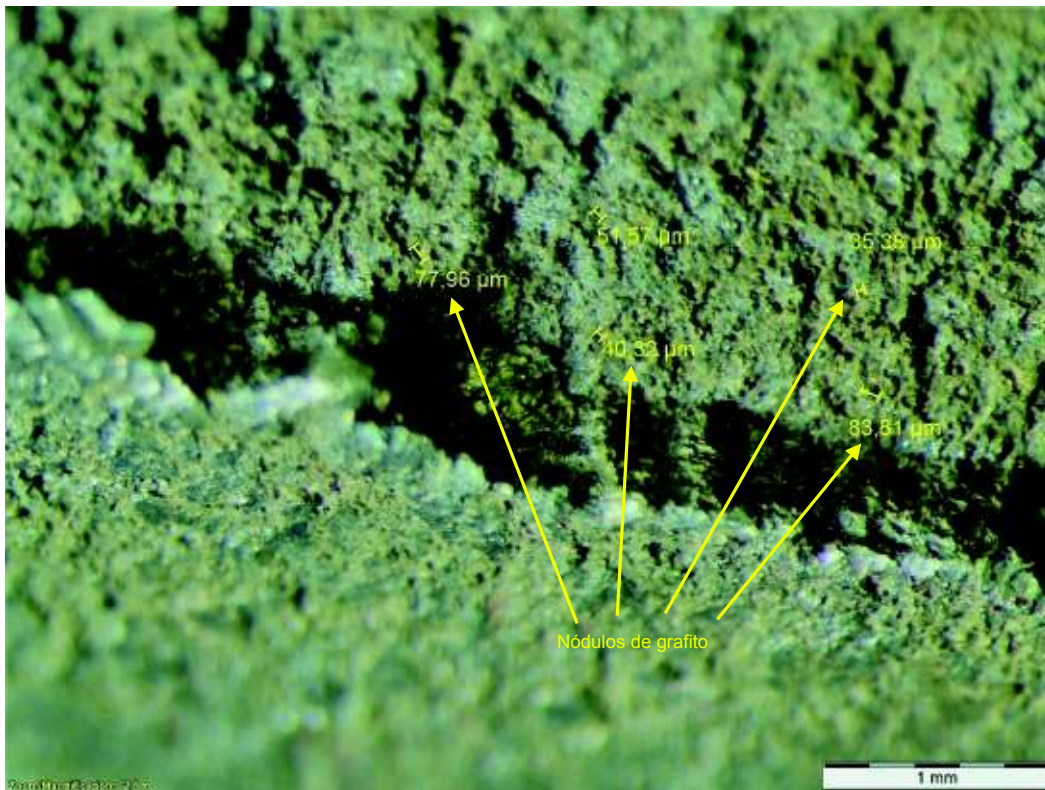


Figura 3.4. Zona de la fractura con nódulos de grafito visibles.
(Fuente Propia)

Macrografías del cigüeñal C-N

La figura 3.5 muestra las marcas de mecanizado del radio de acuerdo del elemento, además, se puede observar una marca de aplastamiento en ésta zona, causada cuando el elemento se encontraba en funcionamiento.



Figura 3.5. Marcas de funcionamiento y de conformado mecánico, a)8X, b)8X.
(Fuente Propia)

Se presenta en la figura 3.6 las marcas de río, que cruzan de un lado al otro de la fractura e indican que la misma es del tipo frágil.

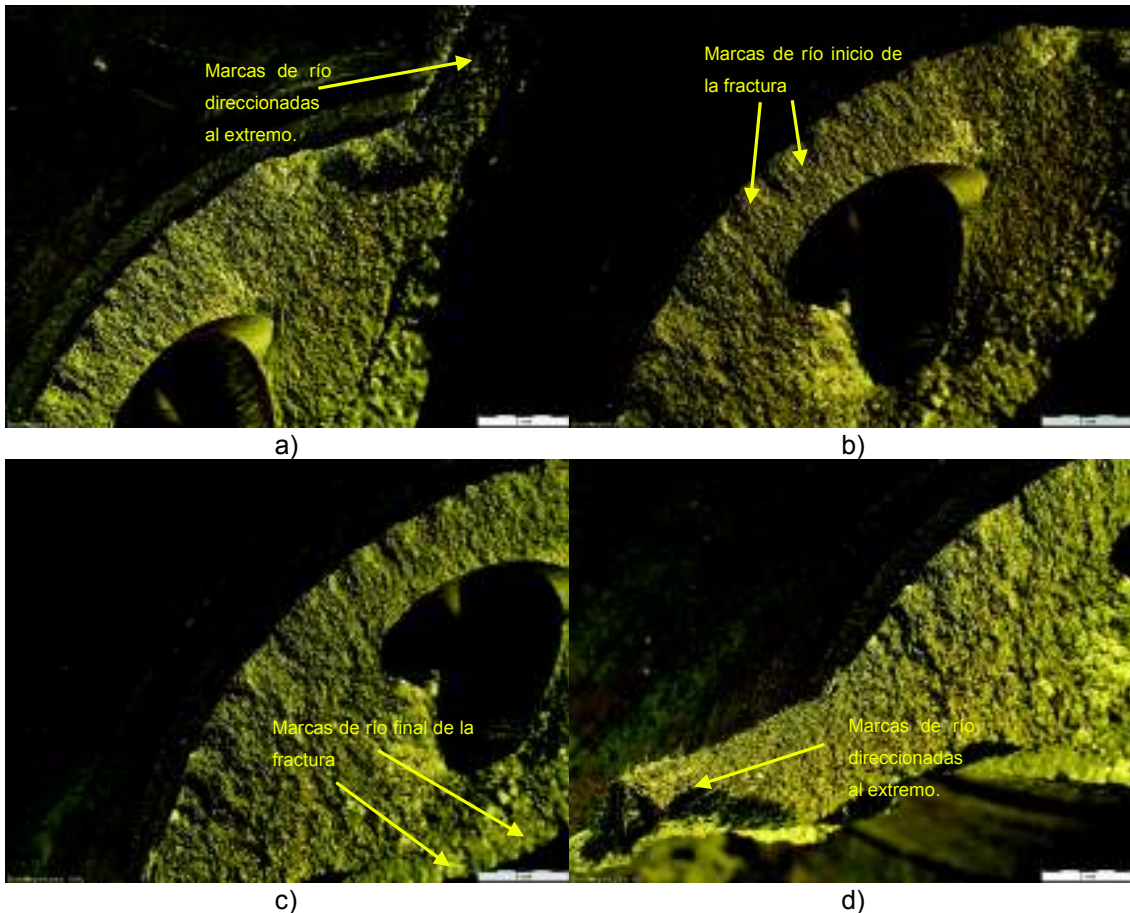


Figura 3.6. Marcas de río sobre la superficie de fractura, a)4X, b)4X, c)4X, d)4X. (Fuente Propia)

Como se muestra en la figura 3.7 existen nódulos de grafito de un tamaño considerable los cuales están distribuidos por toda la superficie de la fractura.

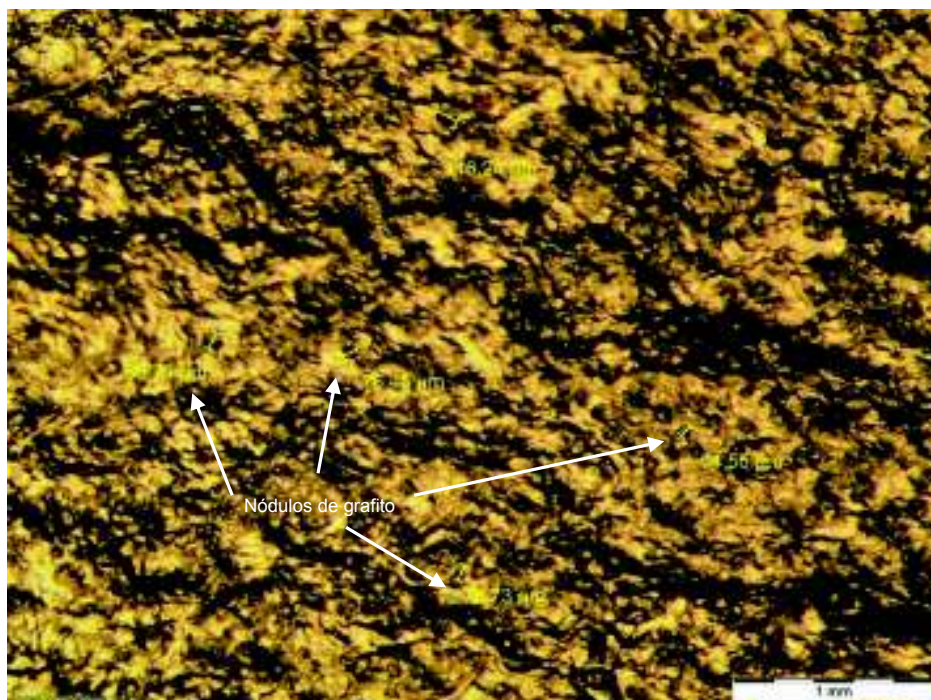


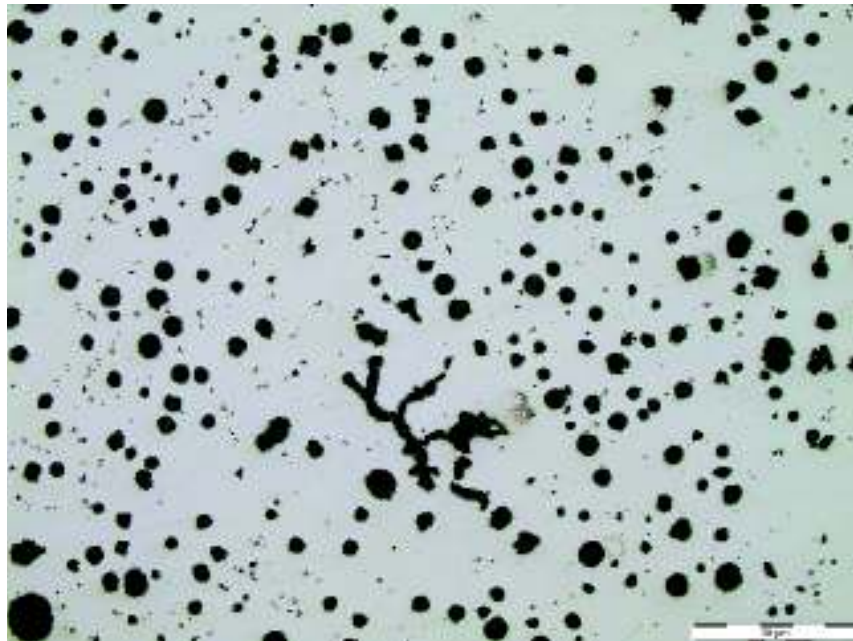
Figura 3.7. Zona de la fractura con nódulos de grafito, 28X. (Fuente Propia)

3.1.4. Micrografías

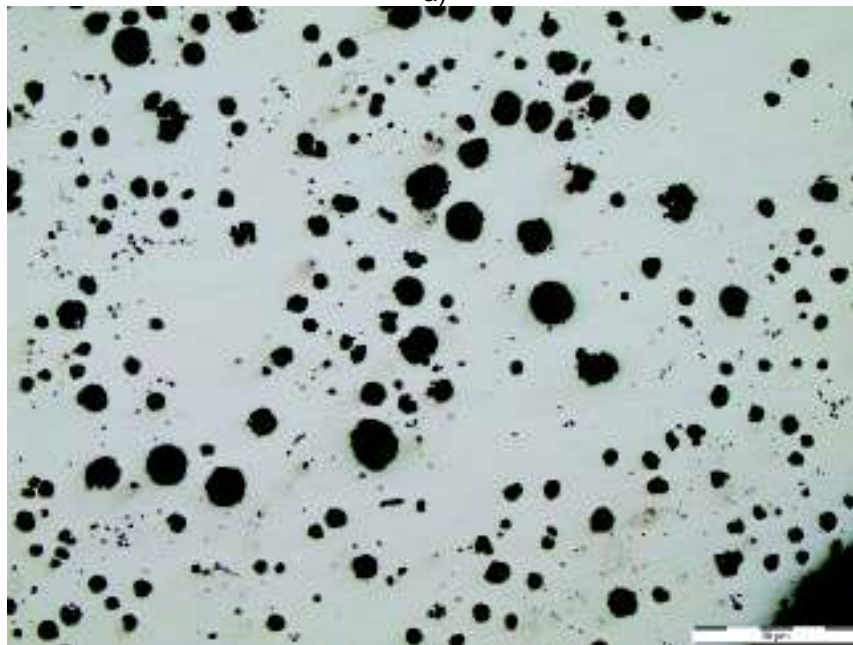
Las imágenes de las micrografías de los cigüeñales que se obtuvieron con la ayuda del microscopio metalográfico se presentan en esta sección bajo la nomenclatura ya establecida.

Micrografía cigüeñal C-V

En la figura 3.8 se puede observar la microestructura del material base sin ataque, donde se identifica la densidad, tamaño y forma de los nódulos de grafito.



a)



b)

Figura 3.8. Micrografías sin ataque, a) centro 100X, b) borde de fractura 100X.
(Fuente Propia)

Una vez realizado el ataque químico con Nital al 10% se tomaron las micrografías a 100X y 500X de la superficie como observa en la figura 3.9, donde se puede identificar que la fundición está presente en dos fases perlítica y ferrítica.

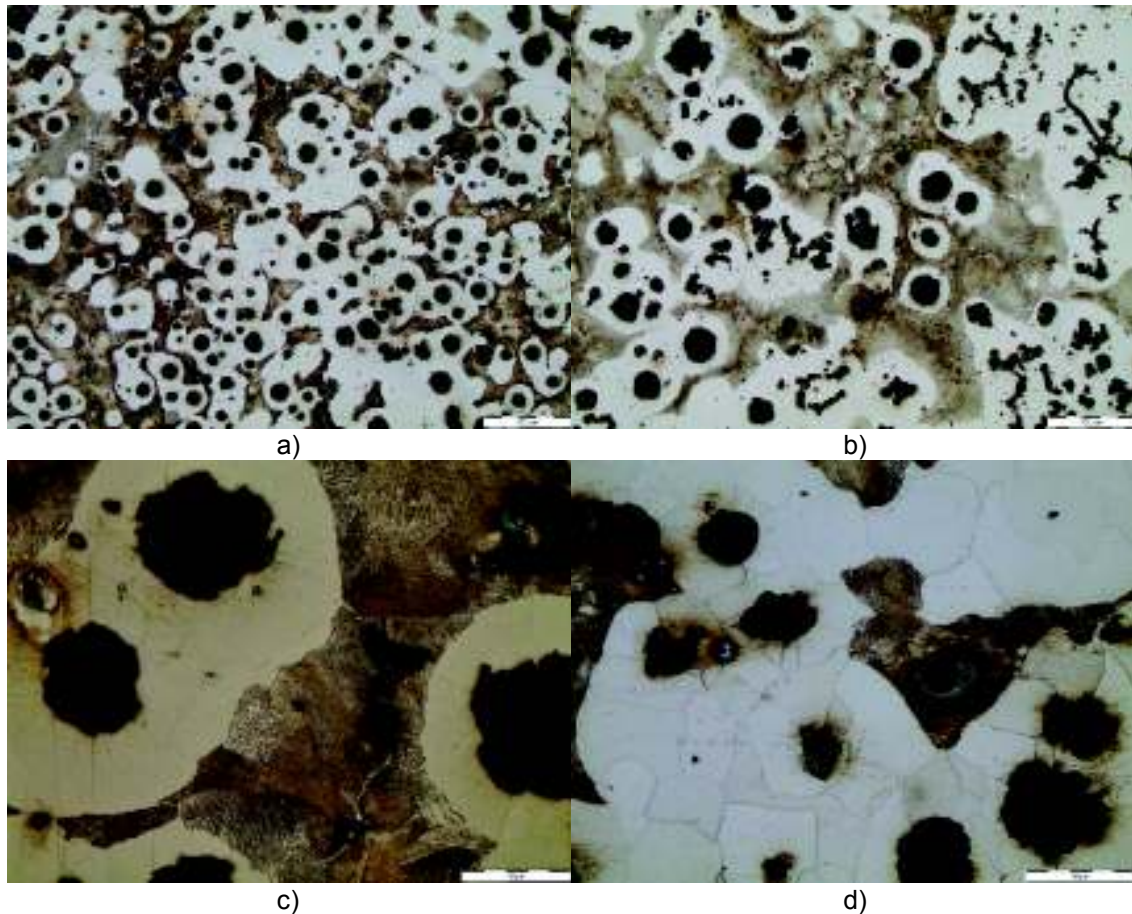


Figura 3.9. Micrografías con ataque, a) 100X, b) 100X, c) 500X, d) 500X.
(Fuente Propia)

La figura 3.10 muestra la zona del radio de acuerdo, donde se dibujó un círculo el cual presenta un área determinada, con la cual se puede calcular el valor nominal del radio de acuerdo que presentan los cigüeñales, como se muestra en el ANEXO 4.

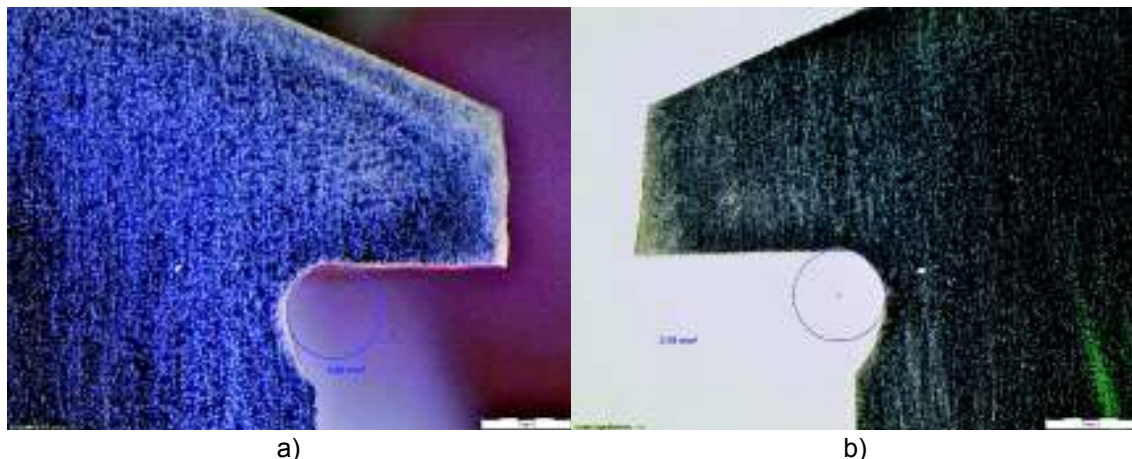
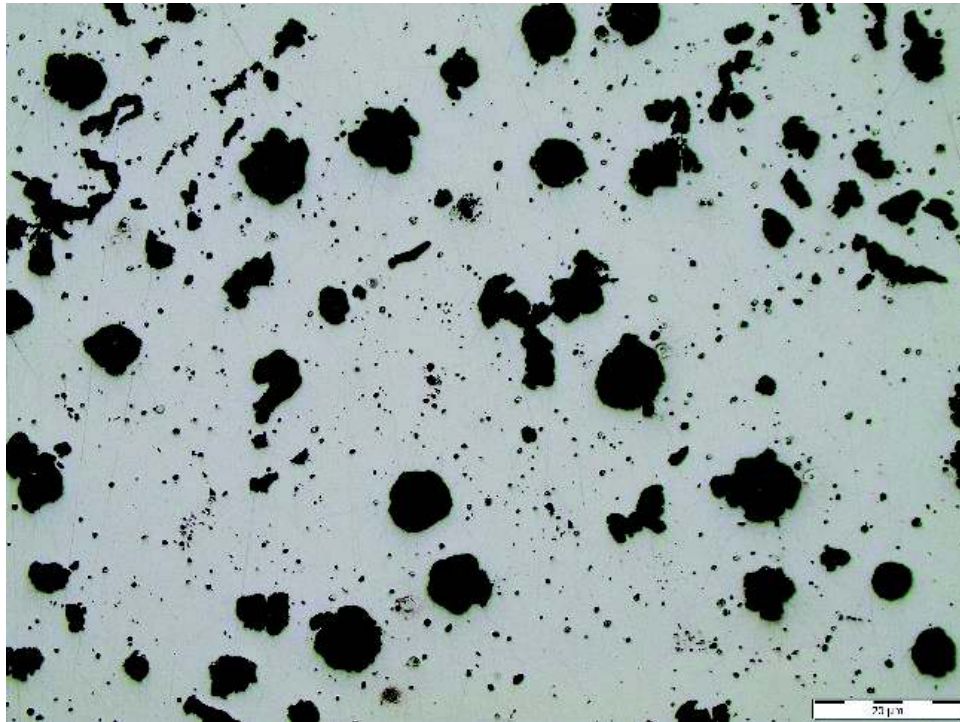


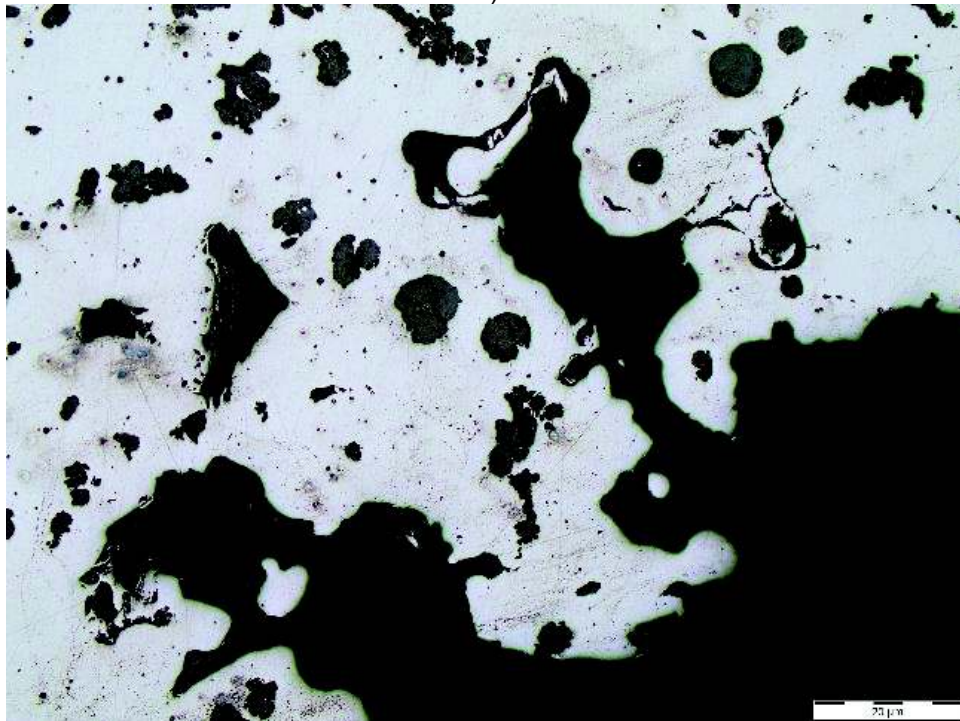
Figura 3.10. Radio de acuerdo, a) mitad izquierda 10X, b) mitad derecha 10X.
(Fuente Propia)

Micrografía cigüeñal C-N

En la figura 3.11 se muestra la microestructura del material base sin ataque, en la que se observa la densidad, tamaño y forma de los nódulos de grafito. Además en la zona cercana a la fractura se puede identificar como ésta ingresa por sobre los nódulos de grafito.



a)



b)

Figura 3.11. Micrografías sin ataque, a) centro 100X, b) borde de fractura 100X.
(Fuente Propia)

Después de realizado el ataque químico con Nital 10% se tomaron las micrografías que se muestran en la figura 3.12 pudiendo observar en éstas los nódulos de grafito y las fases de la fundición presentes en el material siendo estas ferrita y perlita.

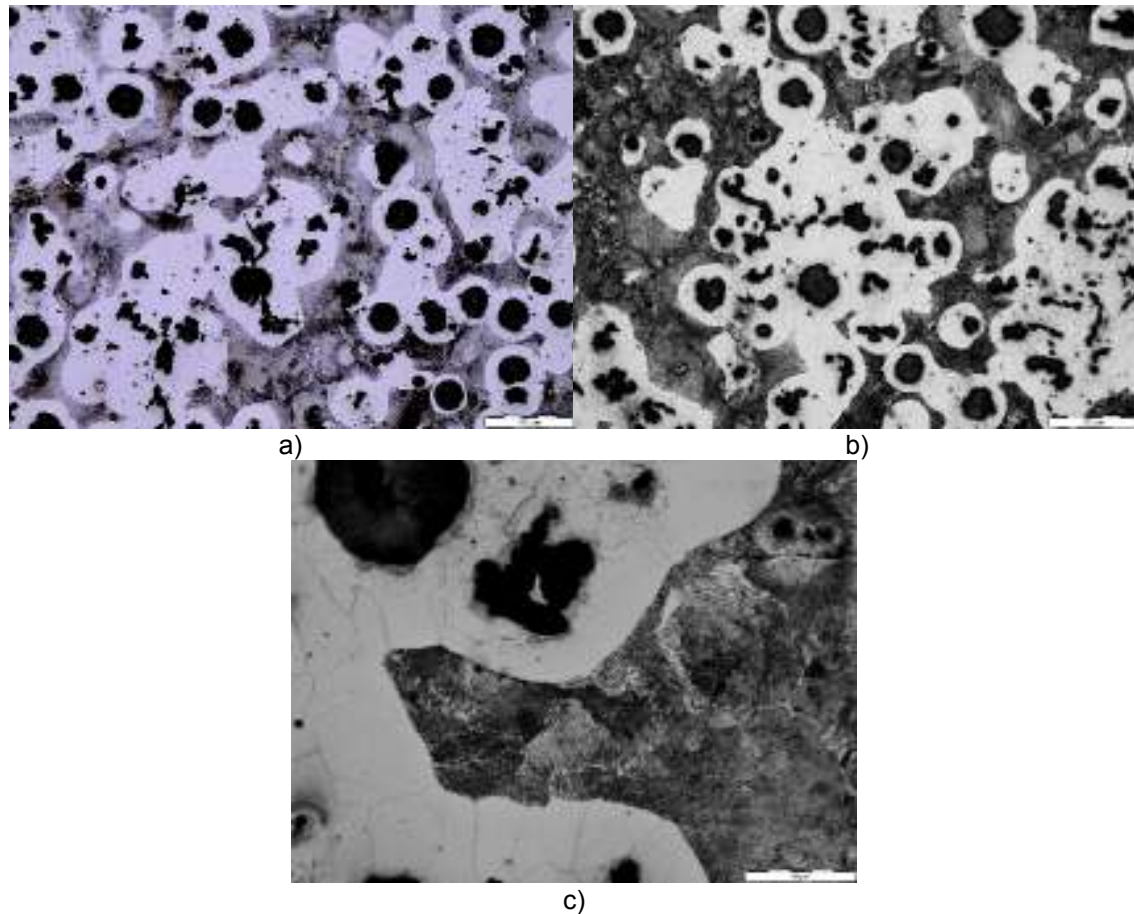


Figura 3.12. Micrografías con ataque, a) 100X, b) 100X, c) 500X.
(Fuente Propia)

La figura 3.13 muestra la zona del radio de acuerdo del elemento, donde se trazó un círculo el cual presenta un área determinada, con la que se calculó del valor nominal del radio de acuerdo como se muestra en el ANEXO 4.

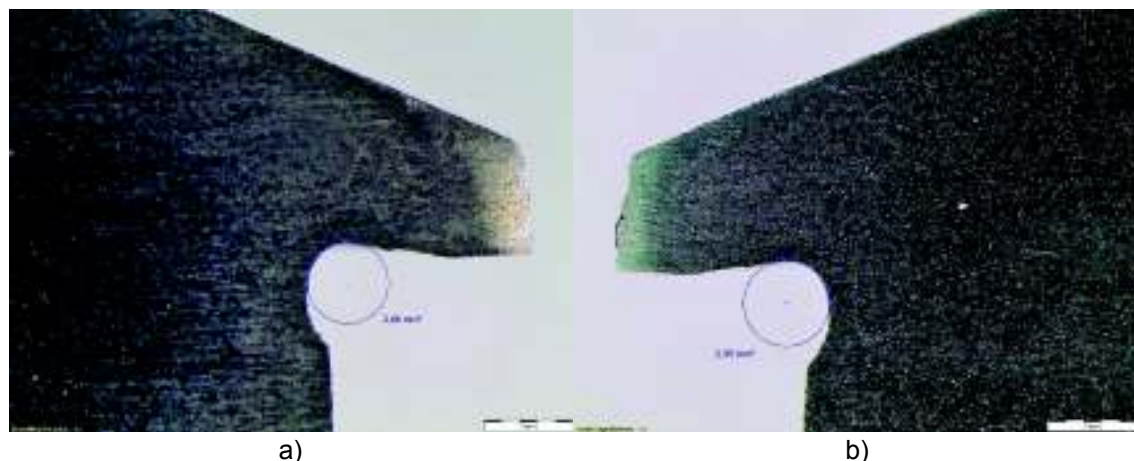


Figura 3.13. Radio de acuerdo, a) mitad izquierda 10X, b) mitad derecha 10X.
(Fuente Propia)

3.1.5. Microscopia electrónica

Las imágenes tomadas por el microscopio electrónico de barrido se muestran en esta sección, en éstas se presentan su escala y están distribuidas por la nomenclatura previamente establecida.

Microscopia electrónica cigüeñal C-V

En la figura 3.14 se puede observar los nódulos de grafito, las líneas de propagación de la fractura y las fisuras que existen en toda la superficie de esta.

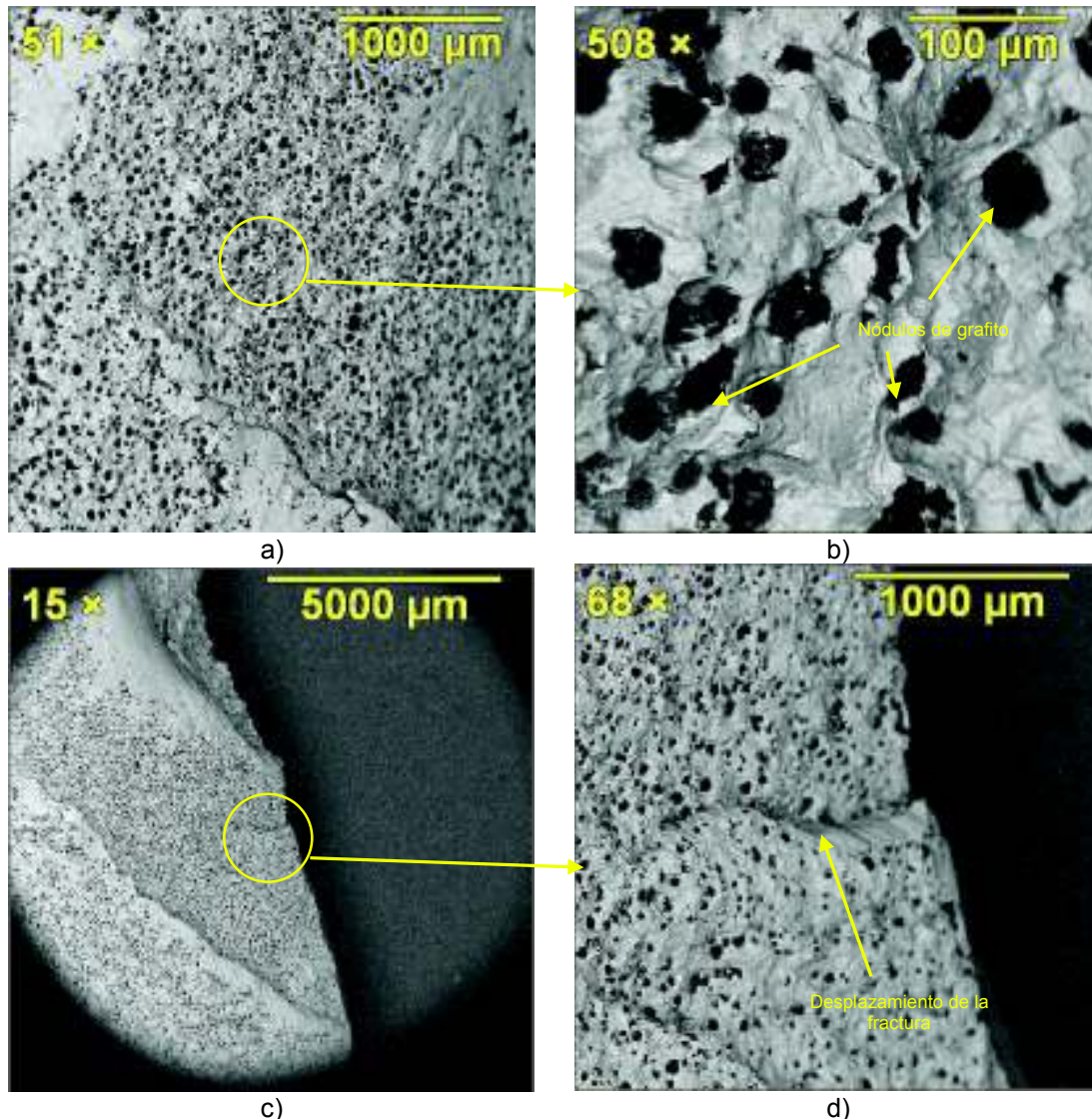


Figura 3.14. Microscopia electrónica, a) 51X, b) 508X, c) 15X, d) 68X.
(Fuente Propia)

Microscopia electrónica cigüeñal C-N

Las imágenes de la figura 3.15 permiten observar los nódulos de grafito tanto en la superficie de fractura como en el radio de acuerdo, además las líneas de la propagación de la fractura y la existencia de fisuras.

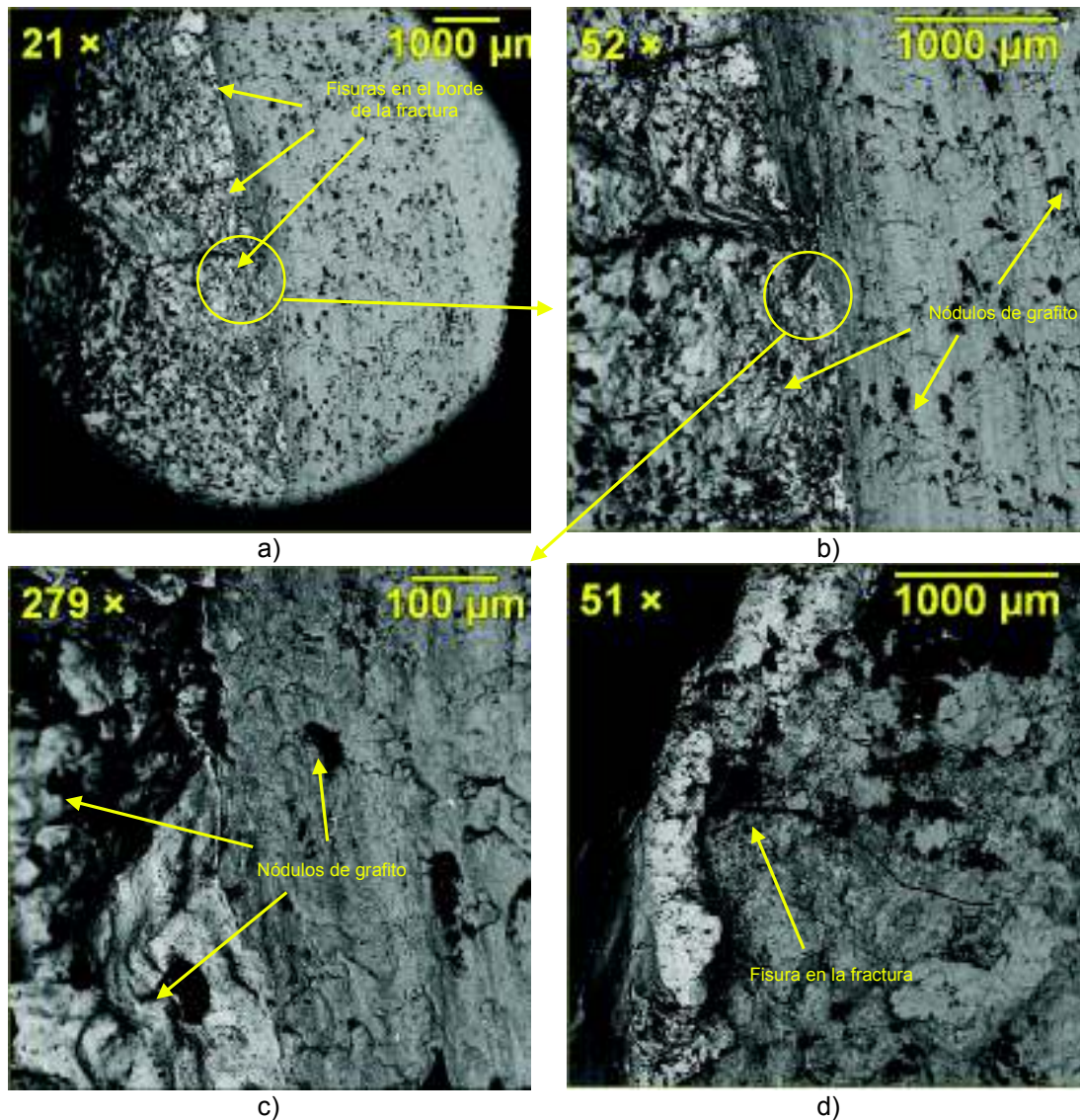


Figura 3.15. Microscopia electrónica, a) 21X, b) 52X, c) 279X, d) 51X.
(Fuente Propia)

3.1.6. Simulación MEF

Los resultados obtenidos con el software Autodesk Inventor del esfuerzo equivalente de Von Mises, se muestran en las figura 3.16 y figura 3.17, donde se distingue el esfuerzo máximo cuyo valor es de 413 MPa y la zona donde este esfuerzo se produce.

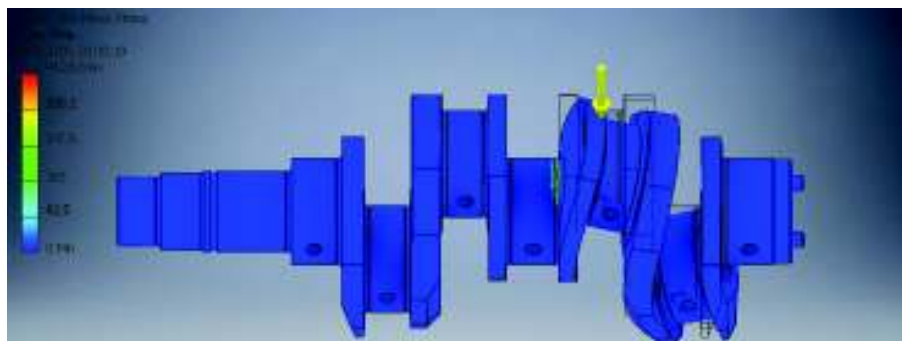


Figura 3.16. Esfuerzo equivalente de Von Mises Inventor.
(Fuente Propia)

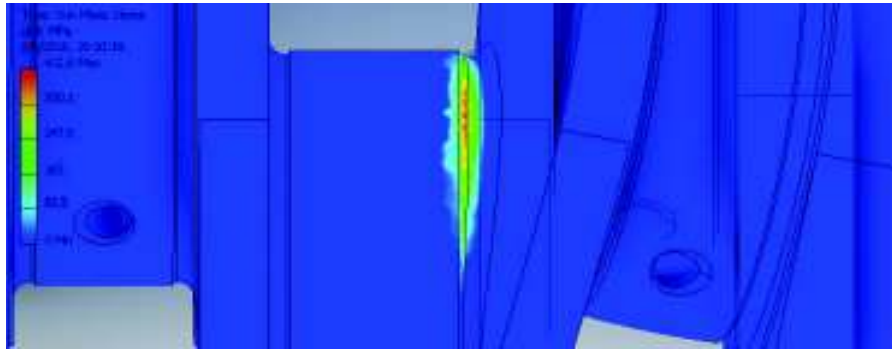


Figura 3.17. Esfuerzo equivalente de Von Mises zona de fractura Inventor.
(Fuente Propia)

La figura 3.18 muestra la gráfica de convergencia para el esfuerzo de Von Mises, en la cual se muestran tres puntos que representan el valor del esfuerzo encontrado versus el número de elementos analizados, y representados por el número de iteración correspondiente. En el ANEXO 5 se encuentra detallado todo el proceso de simulación.

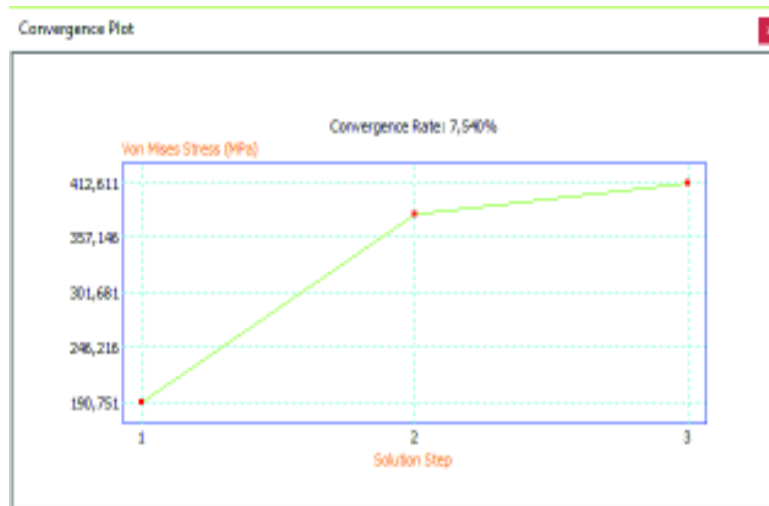


Figura 3.18. Gráfico de convergencia Inventor.
(Fuente Propia)

Los resultados obtenidos en el software ANSYS se pueden observar en las figura 3.19 y figura 3.20, y muestran el resultado del esfuerzo equivalente de Von Mises, el cual en su punto máximo tiene un valor igual a 406 MPa y la zona en la que se genera dicho esfuerzo.

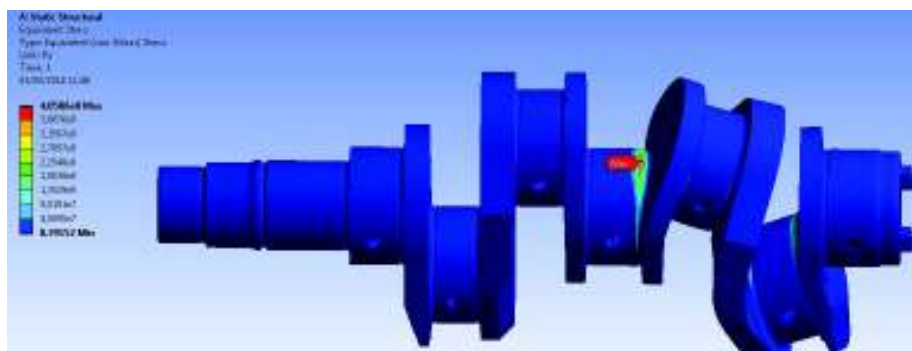


Figura 3.19. Esfuerzo equivalente de Von Mises ANSYS.
(Fuente Propia)

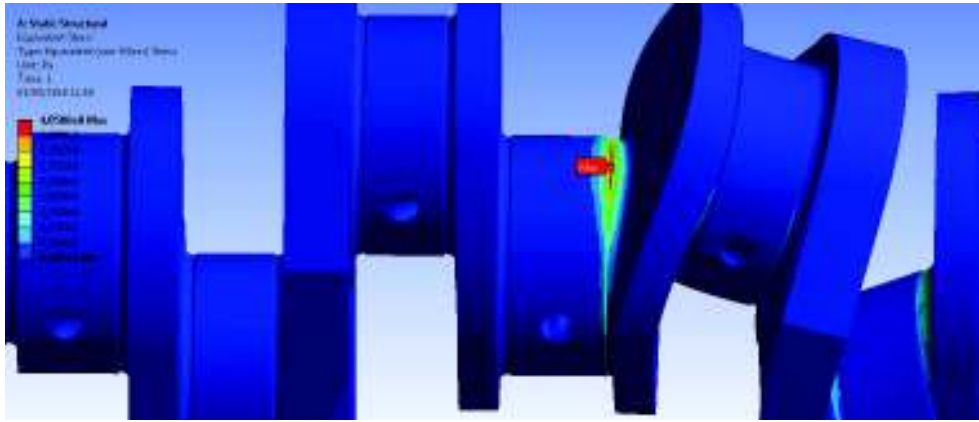


Figura 3.20. Esfuerzo equivalente de Von Mises zona de fractura ANSYS.
(Fuente Propia)

Se muestra en la figura 3.21 el gráfico de convergencia del esfuerzo de Von Mises, en éste se observa cómo se va estabilizando la respuesta en función de la cantidad de nódulos y elementos que se analizan. El procedimiento completo para la simulación se detalla en el ANEXO 6.

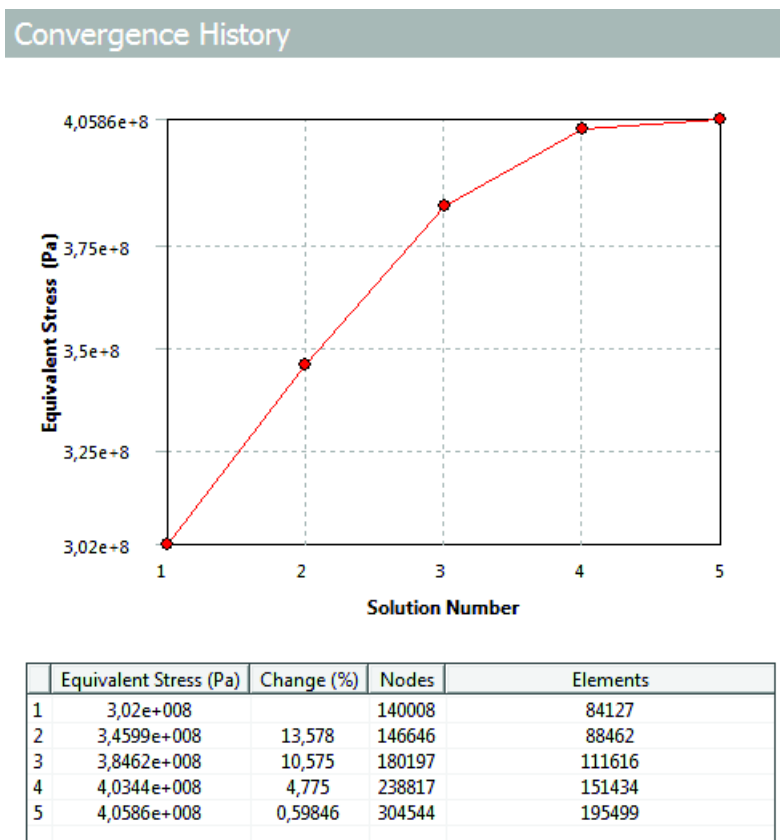


Figura 3.21. Gráfico de convergencia ANSYS.
(Fuente Propia)

3.2. Discusión de resultados

Para el análisis de los resultados de los ensayos mostrados en las secciones anteriores se debe tomar como referencia las características del material normalizado que más se asemeje a los materiales con los que están conformados estos dos cigüeñales, teniendo

en cuenta que dicho material presente entre sus aplicaciones el conformado de cigüeñales.

3.2.1. Análisis de composición química

De los resultados de composición química expuestos en la tabla 3.1 que corresponden a las muestras de los cigüeñales de estudio C-V y C-N, se consideraran los valores porcentuales del carbono, silicio, manganeso, cromo, níquel, azufre, fósforo, cobre y magnesio, los cuales serán comparados con los elementos aleantes tabulados en el Metals Handbook ASM Vol.1 (ASM International, 2005). En la tabla 3.3 se observan estos valores.

Tabla 3.3. Comparación de valores de composición química.

Material	C-V (%)	C-N (%)	ASM Handbook (%)
Carbono	3,841	3,586	3,60 – 3,80
Silicio	2,656	2,875	1,80 – 2,80
Manganeso	0,288	0,421	0,15 – 1,00
Fósforo	0,037	0,033	0,03 max
Azufre	0,0047	0,0053	0,002 max
Cromo	0,087	0,196	0,03 – 0,07
Níquel	0,038	0,052	0,05 – 0,20
Cobre	0,0086	0,01	0,15 – 1,00
Magnesio	0,033	0,041	0,03 – 0,06

(Fuente Propia)

El porcentaje de carbono presente en las dos muestras analizadas está dentro del rango de valores que recomienda el Metals Handbook ASM Vol.1 (ASM International, 2005) para la fundición nodular o dúctil, este elemento es el encargado de formar las distintas microestructuras después del enfriamiento, generar los nódulos de grafito y es el primer responsable de dar dureza y resistencia a la fundición, su exceso disminuye la resistencia a la fatiga y al impacto, como grafito aumenta la lubricación durante el maquinado y ayuda a reducir el efecto de las vibraciones.

Se puede observar que el valor de silicio en ambos cigüeñales se encuentra dentro del rango, este elemento favorece la grafitización y ayuda a la formación de ferrita, de manera tal que un bajo porcentaje aumenta la dureza, disminuyendo la ductilidad y aumentando la fragilidad. Se tiene que el manganeso está dentro del rango de valores permitidos para el material, a diferencia del silicio este elemento se opone a la grafitización y ayuda a estabilizar los carburos presentes, también aumenta la dureza y afina la perlita.

Los valores tanto del fósforo como del azufre están relativamente dentro del rango de las referencias, los cuales son elementos perjudiciales para la fundición, ya que el azufre generalmente se considera una impureza por reducir la resistencia del material aunque

puede usarse para aumentar la maquinabilidad del elemento, por otro lado el fósforo reduce la resistencia al impacto y tiende a generar segregaciones, aunque su uso está en aumentar la fluidez de la colada al momento de la fundición.

La cantidad de cromo 0,086% y 0,196% presente en las muestras C-V y C-N respectivamente se encuentran dentro del rango en el que este elemento ayuda a afinar la perlita y el grano de la fundición, se opone a la grafitización y estabiliza los carburos. Por su parte el valor porcentual de níquel que se observa en ambas muestras de los elementos está dentro del rango, el níquel evita el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos, favorece la grafitización, afina la perlita y da dureza a la fundición, su déficit reduce las propiedades mecánicas.

El valor del cobre está por debajo del rango de análisis, este elemento favorece la grafitización y aumenta la dureza del material, su déficit favorece la ductilidad pero reduce las propiedades mecánicas. Por otro lado el magnesio se encuentra dentro del rango analizado, este ayuda a la formación de grafito esferoidal con lo cual favorece la ductilidad, resistencia y tenacidad del material.

Como se puede observar la composición química de las muestras de los dos elementos, está dentro del rango de composición química tabulados en el Metals Handbook ASM Vol.1, por lo tanto el material con el cual están fabricados los cigüeñales corresponde a hierro nodular o dúctil.

3.2.2. Análisis de durezas

Para este análisis se usa el rango de valores de dureza de la fundición nodular o dúctil SAE J434 D5506, que es típicamente aplicada en la fabricación de cigüeñales, este rango está establecido en el Metals Handbook ASM Vol.1 (ASM International, 2005). Los valores se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Comparación promedio de durezas.

Dureza		
C-V HB	C-N HB	ASM Handbook HB
191	178	187 – 255

(Fuente Propia)

El material del cigüeñal C-V presenta un valor de dureza dentro del rango presentado por el Metals Handbook ASM Vol.1 (ASM International, 2005) para el hierro nodular o dúctil SAE J434 D5506, mientras que la dureza el material del cigüeñal C-N está por debajo de dicho valor, lo que se puede deber a que los nódulos de grafito presentes en la microestructura de éste son de un tamaño mayor que los que muestra el material del cigüeñal C-V. Al ser la dureza una propiedad que viene ligada con la resistencia

mecánica de los materiales, se puede estimar que la resistencia mecánica del material del cigüeñal C-V tiene un valor similar al de la fundición de hierro nodular o dúctil SAE J434 D5506 y que por el contrario para el material del cigüeñal C-N tendría un valor menor que la establecida para dicho material.

3.2.3. Análisis de falla

Ambas fracturas son de carácter frágil y presentan muchas similitudes entre sí (figura 3.2 y figura 3.6), ya que poseen varios puntos de inicio, que se visualizan en la zona del radio de acuerdo del muñón central y se desplazan formando marcas de río que se pueden observar en la superficie de fractura, estas marcas se desplazan transversalmente formando un ángulo de aproximadamente 60° hasta alcanzar el radio de acuerdo de la tercera muñequilla.

En los dos cigüeñales se observa que en la zona del radio de acuerdo (figura 3.1, figura 3.3 y figura 3.5), existen marcas de maquinado, denotando el deficiente acabado superficial de los elementos, siendo este otro factor a tomar en cuenta para la concentración de esfuerzos en esta zona. En la macrografía de la zona del radio de acuerdo del cigüeñal C-V (figura 3.3), se observa como una fisura se separa de la fractura principal y se desplaza sobre las marcas del maquinado. El cigüeñal C-N presenta una marca de aplastamiento, el cual es posterior a la fractura.

Las macrografías de superficie de fractura (figura 3.4 y figura 3.7), al igual que en la microscopia electrónica (figura 3.14 y figura 3.15), muestran que la fractura se desplaza atravesando los nódulos de grafito hasta alcanzar el otro extremo del brazo del cigüeñal, esto debido a que los nódulos formados tienen un tamaño considerable lo que le aporta una elevada fragilidad, ocasionando que la tenacidad de los elementos sea muy baja.

Este análisis determina que posiblemente las fracturas fueron ocasionadas debido a que el cigüeñal sufrió una parada abrupta, misma que se produjo cuando la presión por efecto de los gases de combustión en el tercer cilindro era máxima.

3.2.4. Análisis micrográfico del material

En las micrografías sin ataque (figura 3.8 y figura 3.11) se observa que el material del cual están conformados los cigüeñales es hierro nodular o dúctil, que se caracteriza por presentar grafito en forma esferoidal o de nódulos, estas imágenes muestran la forma, tamaño y concentración de estos nódulos. El análisis de las propiedades de los nódulos de grafito (tipo, clase, nodularidad y conteo de nódulos por milímetro cuadrado), se lo realiza gracias a las facilidades del software Stream Essentials del microscopio que lo realiza en base a las normas ASTM A247-10 y ASTM E2567-11, dando como resultado

los valores expuestos en la tabla 3.5, siendo estos comparados con los valores presentados en la norma SAE J434 para la fundición nodular o dúctil. Los informes completos para el cigüeñal C-V y C-N se encuentran en los ANEXO 7 y ANEXO 8 respectivamente.

Tabla 3.5. Análisis de las propiedades del grafito.

Propiedad del grafito	C-V	C-N	SAE J434
Tipo	II	III	I-II
Clase	6	4	5-8
Nodularidad	86,1 %	63,7 %	>80%
Partículas / mm ²	156	30	---

(Fuente Propia)

Realizando la comparación se tiene que el grafito en el material del cigüeñal C-V cumple con las propiedades establecidas por la norma SAE J434, con valores que están dentro del rango de las propiedades para este tipo de fundiciones, por su parte el material del cigüeñal C-N no cumple con ninguna de las propiedades establecidas del grafito.

En base al análisis se determina que según la norma SAE J434 el material del cigüeñal C-V es homogéneo y que no presenta mayores discontinuidades, por otro lado el material del cigüeñal C-N presenta una heterogeneidad en cuanto a la nodularización del grafito, siendo la cantidad de nódulos por milímetro cuadrado baja con respecto a la muestra C-V, lo que puede favorecer la formación de fisuras y su propagación en los procesos de fractura.

Las micrografías con ataque químico de nital al 10% (figura 3.9 y figura 3.12), muestran que las matrices de los materiales son ferrítico-perlíticas, el valor porcentual de existencia que muestran las fases ferrita y perlita de la fundición fueron determinadas con ayuda del software Stream Essentials del microscopio, siendo estos comparados con los valores que presenta la norma SAE J434 detallados en la tabla 3.6. Los informes completos se encuentran en los ANEXO 9 y ANEXO 10 para los cigüeñales C-V y C-N respectivamente.

Tabla 3.6. Análisis de las fases de la matriz de la fundición.

Fase	C-V	C-N	SAE J434
Perlita	53 %	60 %	50 %
Ferrita	47 %	40 %	50 %

(Fuente Propia)

El material del cigüeñal C-V y C-N presenta una concentración de la fase ferrítica de 47% y 40% respectivamente, valores que se encuentran fuera del valor que establece la norma SAE J434.

Con el análisis del material del cigüeñal C-V se determina que presenta propiedades mecánicas muy cercanas al material SAE J434 D5506 (norma equivalente ASTM A536

GR 80-55-06), ya que los valores de sus características analizadas están dentro de los rangos establecidos. Por el contrario el análisis del material del cigüeñal C-N determina que presenta propiedades mecánicas y microestructurales inferiores a lo que requiere la norma SAE J434.

3.2.5. Análisis de los resultados de la simulación MEF

Las propiedades mecánicas del material ASTM A536 GR 80-55-06 que se detallan en la tabla 3.7 fueron extraídas del Metals Handbook ASM Vol.1 (ASM International, 2005), estos son los valores usados para el cálculo del esfuerzo máximo a fatiga como se muestra en el ANEXO 3, valor que se utiliza para la comprobación del criterio de aceptación dado en el Blue Book de IACS (International Association of Classification Societies, 2017).

Los valores expresados en la tabla 3.7 fueron utilizados en la simulación del elemento detallada en la sección 2.6.

Tabla 3.7. Propiedades hierro dúctil ASTM A536 GR 80-55-06.

ASTM A536 GR 80-55-06	
Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tensión	552 MPa
Limite elástico	379 MPa
Alargamiento	6 %
Densidad	7,15 gr/cm ³
Módulo de Poisson	0,31
Módulo de Elasticidad	168 GPa

(Fuente ASM International, 2005)

En la simulación se puede observar que el esfuerzo máximo tiene lugar en la zona del radio de acuerdo entre el muñón central y la muñequilla del tercer cilindro, lo cual coincide perfectamente con la fractura que se produjo en los elementos reales por lo cual la simulación queda validada para el análisis.

De los resultados de la simulación realizada del modelo (figura 3.16, figura 3.17, figura 3.19 y figura 3.20), se extrae el valor máximo del esfuerzo equivalente de Von Mises, el cual será comparado con el valor de esfuerzo máximo calculado y con el limite elástico del material ASTM A536 GR 80-55-06.

El cálculo del esfuerzo fue realizado con ayuda de las ecuaciones extraídas del Blue Book de IACS (International Association of Classification Societies, 2017), en su sección M53 Calculation for I.C. Engine Crankshafts, la que presenta las ecuación para el cálculo del esfuerzo máximo para los cigüeñales, y detallado en el ANEXO 3. Los gráficos de convergencia (figura 3.18 y figura 3.21), muestran como la respuesta se estabiliza a medida que aumentan el número de elementos en la malla para la simulación.

En la tabla 3.8 se tiene los valores máximos del esfuerzo de Von Mises obtenidos en las simulaciones realizadas tanto en el software ANSYS como Inventor.

Tabla 3.8. Esfuerzo de Von Mises.

Esfuerzo	ANSYS MPa	Inventor MPa	Calculado MPa
Von Mises	406	413	399

(Fuente Propia)

El error que existe entre el valor de esfuerzo calculado de 399 MPa y el valor de esfuerzo de Von Mises de la simulación en el software ANSYS de 406 MPa es de 1,75% y en el Inventor de 413 MPa es de 3,44%, valores de error que son aceptables para los dos casos. Hay que aclarar que el hecho de que los valores de error sean bajos no significa que los métodos utilizados para el cálculo en los diferentes casos sean iguales, aunque las ecuaciones utilizadas para los cálculos son equivalentes ya que parten del mismo criterio de cálculo.

El esfuerzo de diseño a fatiga y el esfuerzo máximo calculados son de 283 MPa y 409 MPa respectivamente, la relación entre estos dos esfuerzos (esfuerzo de fatiga / esfuerzo máximo) conocida como criterio de aceptación es igual 0,69. De acuerdo al Blue Book para que un cigüeñal sea considerado como aceptable debe cumplirse que este criterio sea mayor a 1,15, realizada la comparación entre lo obtenido con lo requerido por el Blue Book se establece que el cigüeñal no soportara las cargas requeridas, el mismo resultado se obtiene al realizar el cálculo con las datos obtenidos mediante simulación (International Association of Classification Societies, 2017).

Al comparar los esfuerzos de Von Mises y el esfuerzo calculado analíticamente, se determina que estos son superiores al límite elástico del material, por lo que la fractura en los dos cigüeñales se produjo posiblemente por un sobreesfuerzo en la muñequilla del tercer cilindro.

3.3. Discusión final análisis forense

Para los dos cigüeñales, se tiene una fractura completa entre el muñón central y la tercera muñequilla, siendo una fractura frágil debido a las marcas de río que se presentan sobre su superficie y a la forma de desplazamiento que poseen éstas, provocadas posiblemente por un sobreesfuerzo que incidió directamente sobre la tercera muñequilla, producto de la presión generada por los gases de combustión al interior de la cámara de combustión.

Del análisis de composición química, dureza y microestructura se determina que el material del cual está conformado el cigüeñal C-V presenta similares características al

material SAE J434 D5506, ya que su dureza está dentro del rango que presenta el Metals Handbook ASM Vol.1. Los porcentajes de cromo y cobre están fuera del rango de composición química que establece el mismo texto. El análisis microestructural está dentro del rango que establece la normal SAE J434 ya que presenta grafito del Tipo II, Clase 6, nodularidad superior al 80% y un 47% de presencia de fase ferrítica, aunque en las micrografías se observa que existen sectores donde el grafito no logra nodularizar completamente. Debido a estos factores este cigüeñal presentó una vida útil de aproximadamente un año antes de fallar.

El material del cigüeñal C-N, por otra parte presenta características inferiores a las que presenta el elemento C-V, ya que su dureza es menor al rango presentado por el Metals Handbook ASM Vol.1. De su composición química se tiene que los porcentajes de cromo y cobre están fuera del rango expuesto por el mismo texto. Su análisis microestructural determina que el material presenta grafito del Tipo III, Clase 4, con una nodularidad del 60% y un 40% de porcentaje de ferrita, lo que está por debajo de los rangos establecidos por la normal SAE J434, de ahí que su tiempo de vida útil se vea reducido a dos meses.

El resultado del esfuerzo máximo calculado de forma manual (399 MPa) y computacional (406 MPa y 413 MPa, ANSYS e Inventor), muestran valores superiores al límite de elástico (379 MPa) del material ASTM A536 GR 80-55-06, determinándose así que este esfuerzo es suficiente para provocar el tipo de fracturas que se observan en los elementos reales.

Con el criterio de aceptación de 0,69 obtenido de analizar los esfuerzos de fatiga y máximo y que es inferior al recomendado por el Blue Book se establece que el cigüeñal no soportará las cargas requeridas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Terminado el presente proyecto se ha logrado alcanzar el objetivo general del proyecto el cual fue: analizar la falla de un cigüeñal mediante técnica de fractografía y simulación mediante método de elementos finitos (MEF).
- Se determina que las fracturas que presentan los cigüeñales se debieron a un sobreesfuerzo momentáneo que se presentó en la tercera muñequilla de cada cigüeñal en su respectivo periodo de funcionamiento, provocado por la presión generada por los gases de combustión sobre el pistón localizado en dicha muñequilla (carga similar a un impacto), ocasionando la fractura de los cigüeñales.
- De los análisis de composición química, metalográficos y mecánicos se determina que las fundiciones con las cuales fueron fabricados los cigüeñales son muy similares a la fundición SAE J434 D5506, sin llegar a presentar la calidad adecuada para soportar las cargas requeridas.
- Para ambos cigüeñales se observa una falta de homogeneidad en la microestructura, con nodularidades del 80 y 60% para los cigüeñales C-V y C-N respectivamente, esta condición facilita la formación de grietas debido a sobrecargas, así como su desplazamiento a través de ellas.
- La simulación permitió corroborar que la fractura se produjo por una sobrecarga generada en la tercera muñequilla del cigüeñal.
- El error existente entre los valores de los esfuerzos de Von Mises obtenidos con los software ANSYS e Inventor y el valor calculado manualmente del esfuerzo máximo corresponde a 1,75% y 3,44% respectivamente, siendo estos errores aceptables y relativamente bajos validando así la simulación realizada.
- Las bajas propiedades mecánicas, químicas y microestructurales de los materiales con los cuales están conformados los cigüeñales, la falta del tratamiento térmico recomendado, el deficiente acabado superficial y el probable desalineamiento de los elementos acoplados, son factores que ayudan a la generación y desplazamiento de la fractura.

4.2. Recomendaciones

- Se debe verificar todos los parámetros cuidadosamente tanto en el proceso de fabricación como en el proceso de montaje de los elementos, para que estos lleguen con las propiedades óptimas para su correcto normal funcionamiento.

- En los procesos de fundición se debe tener especial cuidado con la velocidad de enfriamiento y los porcentajes de los elementos aleantes que se adicionan en estos, ya que estos son los que van a determinar las propiedades finales para la pieza que se fabricara.
- Se deben realizar todos los procesos adicionales necesarios, ya sean estos tratamientos térmicos o refinamiento en el acabado superficial para garantizar las propiedades idóneas de los elementos conformados.
- Los productos genéricos en general son de regular a buena calidad, pero hay que tener en cuenta que no son diseñados para soportar las máximas exigencias que se pueden presentar en los sistemas en los cuales van a ser usados, por lo cual hay que saber elegir cuidadosamente estos y pedir de ser posible la mayor cantidad de información sobre estos para verificar que cumplan con los parámetros requeridos para su normal funcionamiento.

5. BIBLIOGRAFÍA

- 3DCadPortal. (19 de Abril de 2012). *3DCadPortal*. Obtenido de WorkNC perfecto para el maquinado de forja en industria pesada: <http://www.3dcadportal.com/worknc-perfecto-para-el-maquinado-de-forja-en-industria-pesada.html>
- Ali Keskin, K. A. (2010). Crack Analysis Of A Gasoline Engine Crankshaft. *Gazi University Journal of Science*, 487-492.
- Alianak, J. P., & Tofoni, J. (s.f.). *Simulación Computacional de Motores Pluricilindricos de Combustión Interna*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Ambadas Naik, S. (2015). Failure Analysis of Crankshaft by Finite Element Method-A Review. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 234-239.
- ASM International. (2005). *ASM Handbook*. Ohio: ASM International.
- ASTM International. (2012). *E140-12b: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. Pensilvania: ASTM International.
- ASTM International. (2014). *A536-84: Standard Specification for Ductile Iron Castings*. Pensilvania: ASTM International.
- ASTM International. (2016). *E18-16: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Pensilvania: ASTM International.
- ASTM International. (2017). *A247-17: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*. Pensilvania: ASTM International.
- ASTM International. (2017). *E381-17: Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings*. Pensilvania: ASTM International.
- ASTM International. (2017). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- Baragetti, S. (2015). Design Criteria for High Power Engines Crankshafts. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 271-281.
- Barkanov, E. (2001). *INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD*. Riga: Riga Technical University.
- Beer, F. P., & Johnston, J. E. (2012). *MECÁNICA DE MATERIALES*. México: McGRAW-HILL.

- Brahmbhatt, J., & Choubey, A. (2012). DESIGN AND ANALYSIS OF CRANKSHAFT FOR SINGLE CYLINDER 4-STROKE DEISEL ENGINE. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 88-90.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN*. New York: Mc-Graw Hill.
- Burgos T., B. S., & Freire S., E. P. (2008). *Análisis de fallas atípicas ocurridas en motores de combustion interna, tanto estacionarios como móviles, del Ecuador*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Castro, G. (2009). *FUNDICIONES*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. México: Mc-Graw Hill.
- Cerpa B., R. M., Mónico M., L. F., Mesa R., M. D., Castillo, S. B., & Bermúdez, J. M. (2016). Diseño preliminar de un motor a pistón para un vehículo urbano empleado en la competencia Shell Eco-Marathon. *Ingenium*, 61-75.
- Deshbhratar, R. J., & Suple, Y. R. (2012). Analysis & Optimization of Crankshaft Using Fem. *International Journal of Modern Engineering Research*, 3086-3088.
- EPN, L. d. (Dirección). (2010). *PROCESO DE FUNDICIÓN CON ARENA EPN PARTE I* [Película].
- Facultad de ingenieria industrial Laboratorio de producción. (2011). *Metalografía protocolo*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Fanbiao, B., & Baoshan, H. (2015). The design of the crankshaft and connecting rod mechanism based on P-V diagram. *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering* (págs. 49-53). Shenzhen: Atlantis Press.
- Farrahi, G., H-Gangaraj, S., Abolhassani, S., Hemmati, F., & Sakhaei, M. (2011). Failure Analysis of a Four Cylinder Diesel Engine Crankshaft Made From Nodular Cast Iron. *The Journal of Engine Research*, 21-28.
- Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A First Course in Finite Elements*. West Sussex: John Wiley & Son.
- Freeman, K. A. (1996). *MANUAL E REPARACIÓN Y AFINACIÓN VOLKSWAGEN 1970-79*. Mexico: Limusa S. A.
- Frias Valero, E. (2004). EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF O FEM)). En E. Frias Valero, *APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS*

ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (págs. 111-144). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Ganesan, V. (2006). *Internal Combustion Engines*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Garcia C., J. A. (2016). *Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Garcia, J. (2013). *Sistema para cambiar la geometría de un motor*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- GL-Group. (2012). *Calculation of Crankshafts for Internal Combustion Engines*. Hamburg: Germanischer Lloyd SE.
- Hervás Lara, C. (2016). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS CONCEPTOS DE COMBUSTIÓN DETONANTE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Heyes, A. M. (1998). AUTOMOTIVE COMPONENT FAILURES. *Engineering Failure Analysis*, 129-141.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Hoag, K., & Dondlinger, B. (2015). *Vehicular Engine Design*. Viena: Springer.
- International Association of Classification Societies. (2017). *Blue Book*. London: IACS – International Association of Classification Societies.
- Ipohorski, M. (2004). *FRACTOGRAFÍA ELECTRÓNICA : SU CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DE FALLAS*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Ipohorski, M., & Acuña, R. J. (1988). *FRACTOGRAFIA Aplicaciones al Análisis de Fallas*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Joshi, J. J., & Patel, D. M. (2017). Design and Failure Analysis of Single Cylinder Petrol Engine Crankshaft using ANSYS Software. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 10549-10555.
- Kahate, C., & Keche, A. (2016). Failure Analysis of Crankshaft using Finite Element approach. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 46-49.

- Kakade, P., & Pasarkar, M. D. (2015). Analyzing and Identifying Various Approaches for Crankshaft Failures. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 76-92.
- Kumar, R. K., Velmani, T. D., & Balasubramani, V. (2016). Numerical Prediction of Fatigue Life of Crankshaft. *Global Research and Development Journal for Engineering*, 73-81.
- Meng, J., Liu, Y., & Liu, R. (2011). Finite Element Analysis of 4-Cylinder Diesel Crankshaft. *I.J. Image, Graphics and Signal Processing*, 22-29.
- Montazersadgh, F. H., & Fatemi, A. (2007). *Stress Analysis and Optimization of Crankshafts Subject to Dynamic Loading*. Toledo: The University of Toledo.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Mexico: Pearson Educación.
- Muir, J. (1997). *Como Mantener tu Volkswagen Vivo Idiotas*. Santa Fe: John Muir.
- Ortiz Prado, A., Ruiz Cervantes, O., & Ortiz Valera, J. A. (2013). *MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*. Mexico: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona: Reverté.
- Pisarenko, G. S., Yákovlev, A. P., & Matvéev, V. (1979). *Manual de resistencia de materiales*. Rumania: Mir Moscú.
- Ramani, J., Ramani, H., & Suhagiya, S. (2013). FE-Analysis of crankshaft of I.C.Engine for increasing the breathing capacity. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 1518-1522.
- Reddy, J. N. (2006). *An Introduction to the Finite Element Method*. Singapur: McGraw-Hill.
- SAE International. (2004). *SAE J434*. Warrendale: SAE. Inc.
- Samaniego, R., & Silva, Á. (2009). *ANÁLISIS DE FUERZAS DEL TREN MOTRIZ EN VEHÍCULOS PESADOS*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Sánchez M., R. A. (2005). *EL CIGÜEÑAL Y SU IMPORTANCIA EN LAS NAVES MERCANTES*. Valdivia: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.

- SANDVIK Coromant. (2003). *Efficient machining of Crankshafts and Camshafts*. Sweden: AB Sandvik Coromant.
- Satish Shenkar, S., & Biradar, N. (2015). Design and Static Structural Analysis of Crank Shaft. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 1393-1398.
- Shamasundar, B. (2003). Crank Shaft forging design optimisation using computer simulation. *Forging Magazine*, 5.
- Shelke, S. S., Dhamejani, C. L., & Gadhave, A. S. (2016). Modeling and Analysis of the Crankshaft Using ANSYS Software. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6976- 6800.
- Silva, F. S. (2003). An Investigation into the Mechanism of a Crankshaft Failure. *Key Engineering Materials*, 351-358.
- Solanki, A., & Dodiya, J. (2014). Design and Stress Analysis of Crankshaft for Single Cylinder 4-Stroke Diesel Engine. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 320-324.
- Spiteri, P., Lee, Y., & Segar, R. (2005). *An Exploration of Failure Modes in Rolled, Ductile, Cast-Iron Crankshafts Using a Resonant Bending Testing Rig*. Pensilvania: SAE Technical Paper.
- Thriveni, K., & Chandraiah, B. J. (2013). Modeling and Analysis of the Crankshaft Using Ansys Software. *International Journal of Computational Engineering Research*, 84-89.
- Valdés, J. A., Coronado, J. J., & García, J. I. (2006). COMPARACIÓN Y ESTUDIO DE LA FRACTURA DEL CIGÜEÑAL DE UN MOTOR DE CUATRO CILINDROS EN LINEA. *Scientia et Technica*, 139-144.
- Volkswagen. (1988). *Manual de Reparaciones Vehiculos Tipos I-II*. Buenos Aires: Volkswagen Argentina S. A.
- Volkswagen. (1996). *Manual de Instrucciones para los Utilitarios VW Pickup/kombi/Furgón*. Buenos Aires: Volkswagen Argentina S. A.
- Wang, C., Zhao, C., & Wang, D. (2005). Analysis of an unusual crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*, 465–473.

ANEXO 1.- Informe de composición química Laboratorio de Fundición



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 18 de junio del 2018

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor M. Sc / Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestras de fundición.


1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas de material de fundición.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de las probetas	Fotografías
Muestras de fundición	Muestra M C - N	
	Muestra M C - V	



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E634 – 12 Standard Practice for Sampling of Zinc and Zinc Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 120 Cast Iron

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 4 mediciones promediando su valor.

Elemento	Muestra M C - N		Muestra M C - V	
		Valor [%]		Valor [%]
Carbono [C]		3,586		3,841
Silicio [Si]		2,875		2,656
Manganeso [Mn]		0,421		0,288
Fósforo [P]		0,033		0,037
Azufre [S]		0,0053		0,0047
Cromo [Cr]		0,196		0,087
Níquel [Ni]		0,052		0,038
Cobre [Cu]		0,010		0,0086
Aluminio [Al]		0,007		0,013
Cobalto [Co]		0,0075		0,0077
Magnesio [Mg]		0,041		0,033
Titanio [Ti]		0,012		0,013
Hierro [Fe]		92,74		92,97
Total		99,985		99,997

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.

ANEXO 2.- Cálculo de la fuerza aplicada al cigüeñal

Primero hay que establecer los datos que proporcionan los diferentes libros y manuales acerca de las características del vehículo Volkswagen Kombi 1.6 de 1996, del aire estándar y del combustible los cuales se detallan en la tabla 1 y en la tabla 2 respectivamente:

Tabla 1. Parámetros del vehículo Volkswagen Kombi 1.6 de 1996.

Característica	Valor
Cilindraje	1584 cm ³
Relación de compresión	7.1:1
N° de cilindros	4
Potencia Máxima	43 kW – 58 HP a 4400 RPM
Torque Máximo	11.2 m kgf a 2600 RPM
Diámetro del pistón	85 mm
Carrera	69 mm
Presión de compresión	120 PSI

(Fuente Volkswagen)

Tabla 2. Datos de aire estándar y combustible.

Característica	Valor
Dosado estequiométrico	14.6 kg _{aire} / kg _{combustible}
R del aire	0.2869 kJ / kg K
K del aire	1.4
Cv del aire	0.722 kJ / kg K
PCI combustible	42.5-43 MJ / kg
Temperatura atmosférica	20° C

(Fuente Payri)

Para el análisis de fuerzas en el cigüeñal se tiene la siguiente nomenclatura:

- r: relación de compresión.
- A: dosado estequiométrico.
- PCI: poder calorífico inferior.
- R: constante universal de los gases ideales.
- K: relación de calores específicos del aire.
- p: presión.
- T: temperatura.
- v: volumen específico.
- Q_a: calor añadido.
- A_p: área del pistón.
- D: Diámetro del pistón.
- V_T: volumen total del cilindraje.
- F: fuerza aplicada sobre el pistón.

Para el cálculo de la fuerza máxima que se aplica sobre el cigüeñal se realiza el análisis del ciclo termodinámico en uno de los pistones aproximándolo al ciclo ideal Otto. En la figura 1 se puede observar la relación que existe entre el volumen del sistema cilindro pistón y la presión dentro de este, en los procesos tanto de compresión como de expansión de los gases, esto da una idea bastante clara de cómo aumenta y disminuye la presión dentro del cilindro.

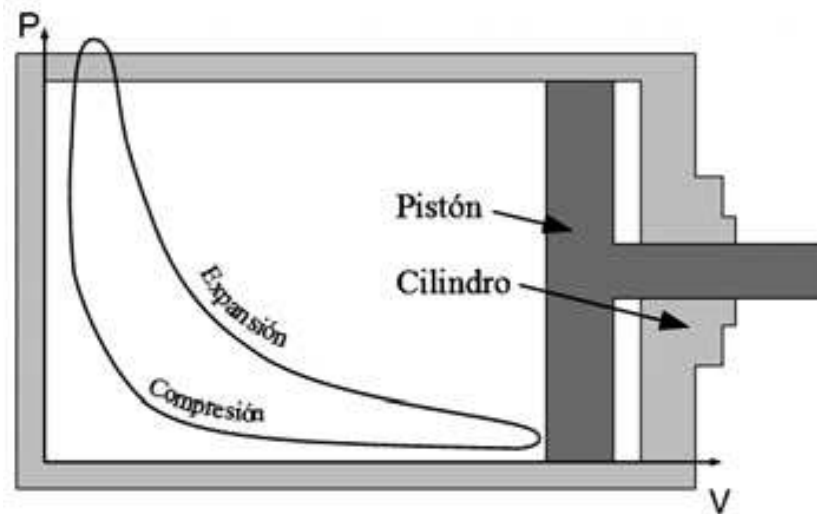


Figura 1. Diagrama presión volumen para el ciclo Otto y su relación con el movimiento del pistón.
(Fuente Payri)

En la figura 2 se puede observar todos los elementos del ciclo real Otto para un motor de 4 tiempos, en el cual se tiene, el bucle de bombeo, en el que están inmersos los procesos de admisión y expulsión de los gases, y el bucle de trabajo, en el cual se realizan los procesos de compresión y expansión. Los puntos que se muestran en la figura 2 son:

- PMS: punto muerto superior.
- PMI: punto muerto inferior.
- p_{es} : presión de escape.
- p_{ad} : presión de admisión.
- AA: apertura de la válvula de admisión.
- AE: apertura de la válvula de escape.
- CA: cierre de la válvula de admisión.
- CE: cierre de la válvula de escape.

Como se puede observar en la figura 2 la presión de los gases de escape es un poco superior a la presión de admisión de la mezcla aire combustible.

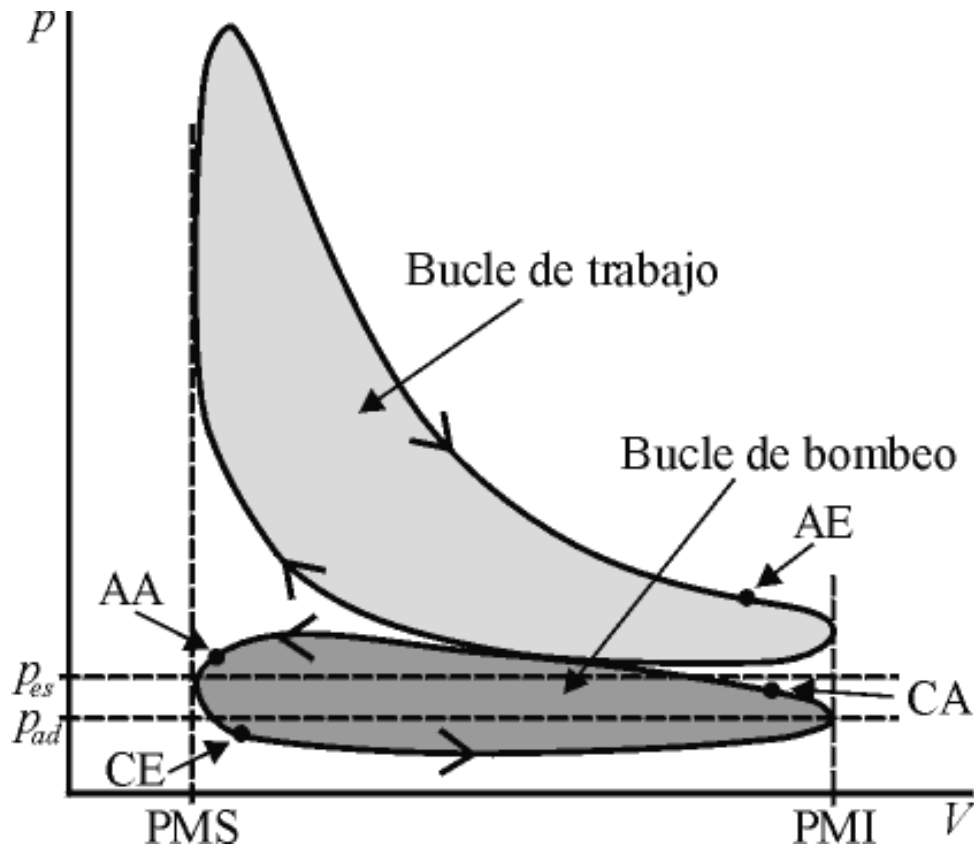


Figura 2. Diagrama presión volumen real de un motor de 4 tiempos.
(Fuente Payri)

La figura 3 muestra los puntos de un ciclo ideal Otto, los cuales pueden ser usados para el cálculo del ciclo y se pueden asumir muy similares al ciclo real. Los procesos que se observan en este diagrama son: 0-1 admisión isobárica, 1-2 compresión isentrópica, 2-3 adición de calor, 3-4 expansión isentrópica, 4-1 rechazo de calor y 1-0 escape isobárico.

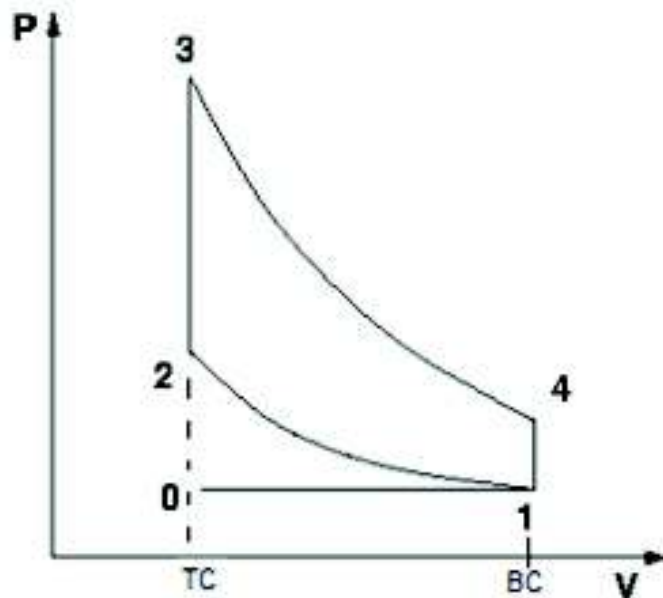


Figura 3. Diagrama ideal ciclo Otto.
(Fuente Cerpa)

Para el cálculo se asumen las condiciones de aire estándar y del combustible que se detallan en la tabla 2. Estos valores se los relaciona con los diferentes puntos que se tiene en diagrama de la figura 3 como se detalla en la tabla 3.

Tabla 2. Relación de datos y diagrama.

Característica	Diagrama	Valor
Presión de compresión	p_2	120 PSI
Temperatura atmosférica	T_1	20 °C

(Fuente Propia)

$$r = 7.1$$

$$A = 14.6 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}$$

$$PCI_{combustible} = 42750 \frac{kJ}{kg_{combustible}}$$

$$R = 0.2869 \frac{kJ}{kg K}$$

$$p_2 = 120 \text{ PSI} = 827.371 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K}$$

$$p_2 = p_1 \times r^K$$

$$p_1 = \frac{827.371 \text{ kPa}}{7.1^{1.4}}$$

$$p_1 = 53.203 \text{ kPa}$$

$$p_1 \times v_1 = R \times T_1$$

$$v_1 = \frac{R \times T_1}{p_1}$$

$$v_1 = \frac{0.2869 \frac{kJ}{kg K} \times 293 \text{ K}}{53.203 \text{ kPa}}$$

$$v_1 = 1.58 \frac{m^3}{kg}$$

$$r = \frac{v_1}{v_2}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{r}$$

$$v_2 = \frac{1.58 \frac{m^3}{kg}}{7.1}$$

$$v_2 = 0.223 \frac{m^3}{kg}$$

$$T_2 = T_1 \times r^{K-1}$$

$$T_2 = 641.758 \text{ K}$$

$$Q_a = \frac{PCI_{combustible}}{A}$$

$$Q_a = \frac{42750 \frac{kJ}{kg_{combustible}}}{14.6 \frac{kg_{aire}}{kg_{combustible}}}$$

$$Q_a = 2928.082 \frac{kJ}{kg_{aire}}$$

$$T_3 = \frac{Q_a}{C_v} + T_2$$

$$T_3 = \frac{2928.082 \frac{kJ}{kg_{aire}}}{0.722 \frac{kJ}{kg_{aire} K}} + 641.758 \text{ K}$$

$$T_3 = 4697.273 \text{ K}$$

$$v_1 = v_4$$

$$v_2 = v_3$$

$$p_3 = \frac{R \times T_3}{v_3}$$

$$p_3 = \frac{0.2869 \frac{kJ}{kg K} \times 4697.273 \text{ K}}{0.223 \frac{m^3}{kg}}$$

$$p_3 = 6043.263 \text{ kPa}$$

$$p_4 = p_3 \times \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^K$$

$$p_4 = 6043.263 \text{ kPa} \times \left(\frac{0.223 \frac{m^3}{kg}}{1.58 \frac{m^3}{kg}}\right)^{1.4}$$

$$p_4 = 389.743 \text{ kPa}$$

$$T_4 = \frac{p_4 \times v_4}{R}$$

$$T_4 = \frac{389.743 \text{ kPa} \times 1.58 \frac{m^3}{kg}}{0.2869 \frac{kJ}{kg K}}$$

$$T_4 = 2195.936 \text{ K}$$

Tabla 3. Puntos del ciclo termodinámico.

Punto	Presión kPa	Temperatura K	Volumen específico m ³ / kg
0	53.20	293	0.22
1	53.20	293	1.58
2	827.37	641.76	0.22
3	6043.26	4697.27	0.22
4	389.74	2195.94	1.58

(Fuente Propia)

Como se puede observar en el diagrama el punto donde la presión es máxima es el tres. Por lo cual se sabe que en este punto pistón se va encontrar en el PMS, por lo cual la fuerza se ejerce de la forma en la que se muestra en la figura 4.

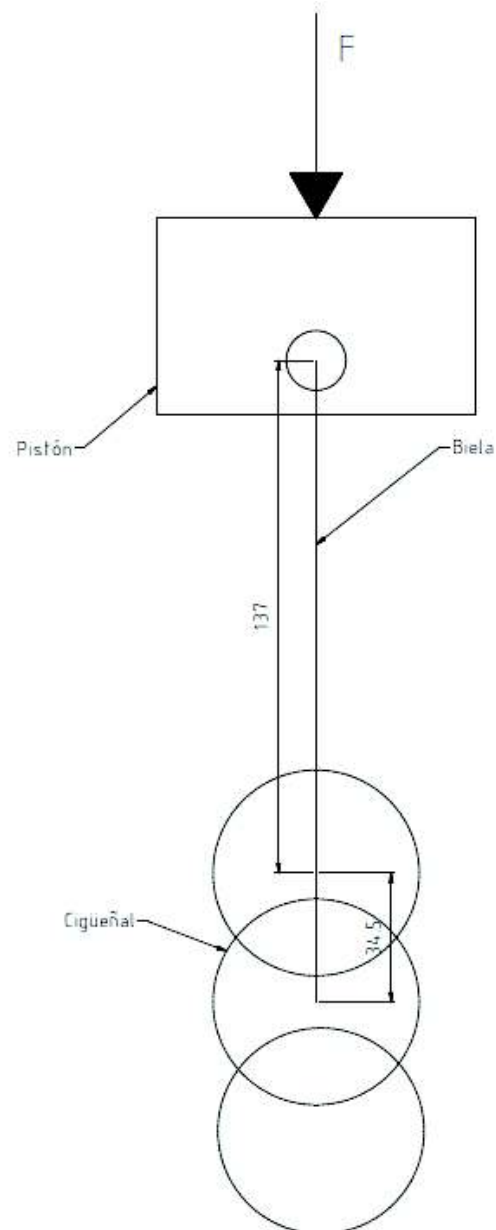


Figura 4. Disposición del sistema biela, cigüeñal y pistón.
(Fuente Propia)

Por lo visto en la figura 4 se puede asumir que la fuerza que se ejerce sobre el pistón sería la misma que se trasmite a través de la biela y que actúa sobre el cigüeñal. Siendo esta fuerza máxima en el punto tres se tiene que:

$$F = p_3 \times A_p$$

$$A_p = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

$$F = 6043.26 \text{ kPa} \times 1000 \frac{\text{Pa}}{\text{kPa}} \times \pi \times \frac{(0.085 \text{ m})^2}{4} = 34293 \text{ N}$$

$$F = 34293 \text{ N}$$

ANEXO 3.- Cálculo de los esfuerzos de diseño y máximos del cigüeñal

El esfuerzo de diseño se lo debe calcular en base a las dimensiones del cigüeñal y al esfuerzo último del material del cual esta manufacturado el cual fue extraído de la norma ASTM A536, estos datos se los tabula en la tabla 1. Se conoce que el esfuerzo para el cual se diseñan los cigüeñales es el esfuerzo a fatiga el cual para un cigüeñal se le calcula mediante la siguiente ecuación extraída del Blue Book (International Association of Classification Societies, 2017):

$$\sigma_{diseño} = K \times (0,42 \times \sigma_m + 39,3) \times \left(0,264 + 1,073 \times D^{-0,2} + \frac{785 - \sigma_m}{4900} + \frac{196}{\sigma_m} \times \sqrt{\frac{1}{R}} \right)$$

Tabla 1. Resultados de las fuerzas que actúan sobre el cigüeñal.

Parámetro	Símbolo	Valor
Constante del material	K	1
Resistencia a la traccion	σ_m	552 MPa
Diámetro del muñón	D	55 mm
Radio de acuerdo	R	≈ 2 mm

(Fuente Propia)

$$\sigma_{diseño} = 1 \times (0,42 \times 552 + 39,3) \times \left(0,264 + 1,073 \times 55^{-0,2} + \frac{785 - 552}{4900} + \frac{196}{552} \times \sqrt{\frac{1}{2}} \right)$$

$$\sigma_{diseño} = 1 \times 271,14 \times (0,264 + 1,073 \times 0,44867 + 0,047551 + 0,3550724 \times 0,70711)$$

$$\sigma_{diseño} = 1 \times 271,14 \times 1,044048554$$

$$\sigma_{diseño} = 283 \text{ MPa}$$

El esfuerzo máximo al cual se ve sometido el cigüeñal se puede asumir que se da el momento en que la fuerza es la máxima sobre este como se muestra en el ANEXO 2, del cual se extrae el valor de esta que se expone en la tabla 2:

Tabla 2. Fuerza que actúa sobre el cigüeñal.

Fuerza	Valor
F	34293 N

(Fuente Propia)

Con esta fuerza se realiza el diagrama de cuerpo de libre que se ve en la figura 1, en la cual se colocan las reacciones que se generan en los puntos de apoyo como se muestra en la figura 2. Al observar estos diagramas se hace necesario para el cálculo de estas la siguiente nomenclatura:

- F: fuerza aplicada sobre el cigüeñal.
- R₁: reacción del block del motor sobre le cigüeñal en el punto 1.

- R_2 : reacción del block del motor sobre le cigüeñal en el punto 2.
- d_1 : distancia del punto 1 al lugar de aplicación de la fuerza F .
- d_2 : distancia del punto 1 al punto 2.

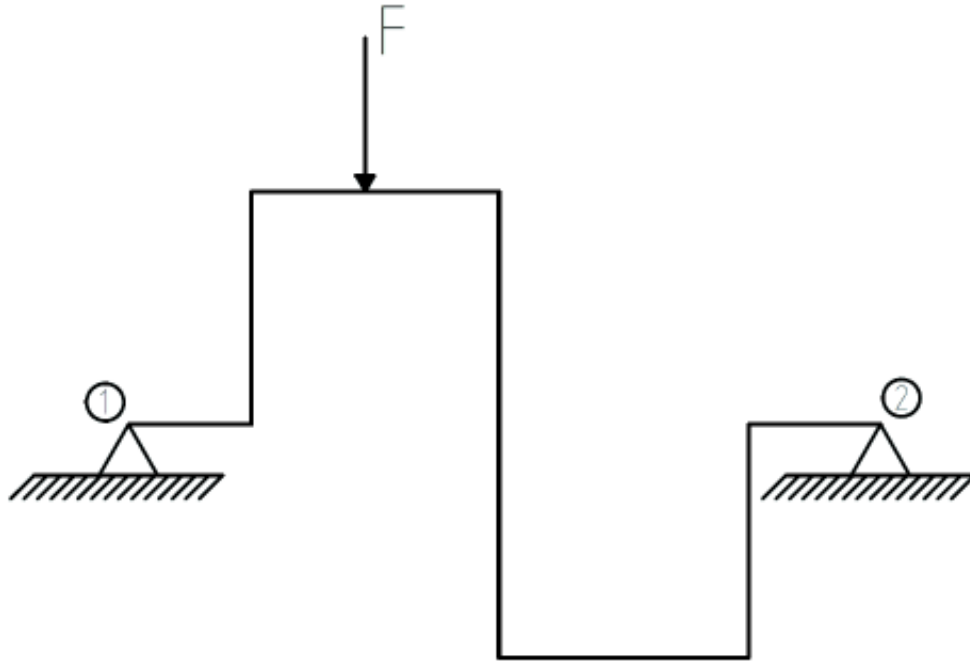


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de la zona de análisis del cigüeñal.
(Fuente Propia)

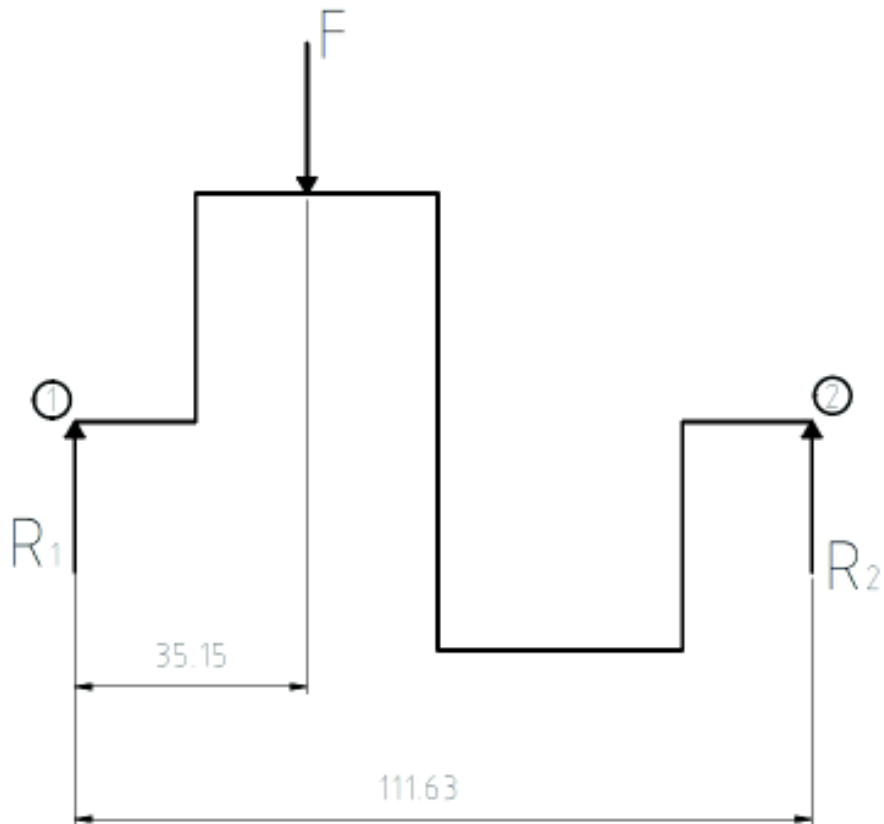


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre reacciones y distancias.
(Fuente Propia)

Por lo que se puede observar en la figura 2 se tiene que:

$$\begin{aligned}\Sigma M_1 &= 0 \\ F \times d_1 - R_2 \times d_2 &= 0 \\ R_2 &= \frac{F \times d_1}{d_2} \\ R_2 &= \frac{34293 \text{ N} \times 35,15 \text{ mm}}{111,63 \text{ mm}} \\ R_2 &= 10798 \text{ N} \\ \Sigma F &= 0 \\ F - R_1 - R_2 &= 0 \\ R_1 &= F - R_2 \\ R_1 &= 34293 \text{ N} - 10798 \text{ N} \\ R_1 &= 23495 \text{ N}\end{aligned}$$

Con los valores de estas reacciones se procede a realizar el diagrama de fuerza que se muestra en la figura 3, con el cual se realiza el cálculo de momentos a los que está sometido el cigüeñal, mediante el cálculo de las áreas de los rectángulos formados por las fuerzas y el eje x que representa la distancia.

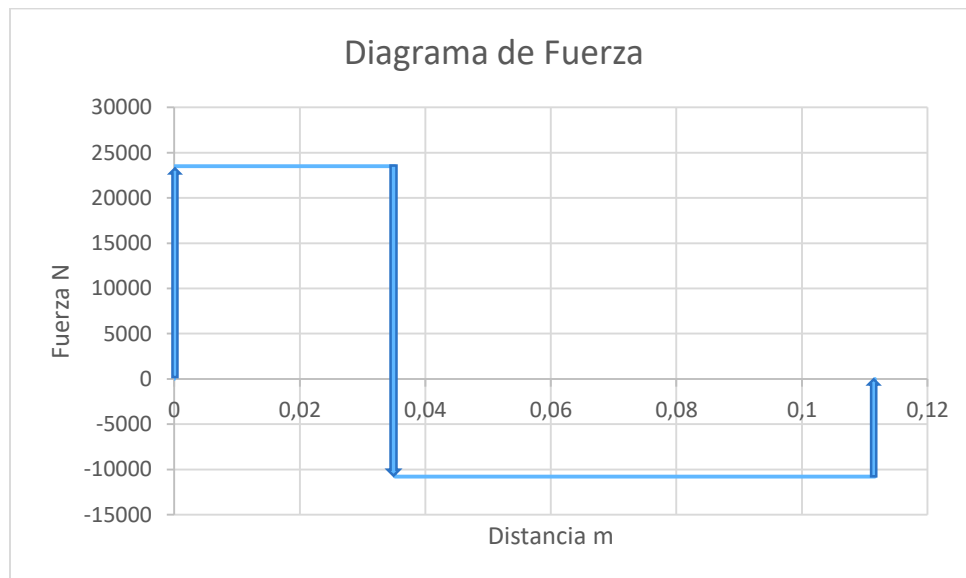


Figura 3. Diagrama de fuerza.
(Fuente Propia)

$$\begin{aligned}M_1 &= R_1 \times d_1 \\ M_1 &= 23495 \text{ N} \times 0,04 \text{ m} \\ M_1 &= 826 \text{ Nm} \\ M_2 &= (R_1 - F) \times (d_2 - d_1) \\ M_2 &= -R_2 \times (d_2 - d_1) \\ M_2 &= -10798 \text{ N} \times (0,11 - 0,04) \text{ m}\end{aligned}$$

$$M_2 = -826 \text{ Nm}$$

Realizando el diagrama de momentos para los valores calculados se obtiene la figura 4, en donde se puede observar que el momento en los apoyos es mínimo e igual a cero y máximo en el lugar donde se aplica la fuerza.

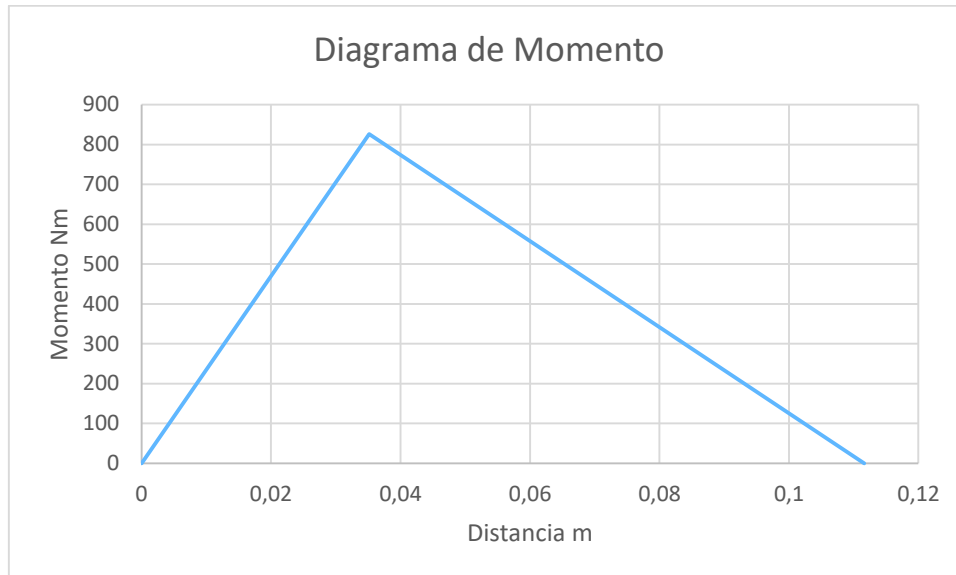


Figura 4. Diagrama de momento
(Fuente Propia)

El cálculo del esfuerzo se lo realiza en relación a la sección de unión de la muñequilla de la biela con el muñón de la bancada, con las ecuaciones extraídas del Blue Book (International Association of Classification Societies, 2017), que se da por efecto de los momentos descritos en el diagrama de la figura 4, para el cálculo además se debe considerar las distancias y espesores que se detallan en la tabla 3 y se pueden ver representados en la figura 5, para el cálculo se tiene la siguiente nomenclatura:

- σ_{1F} : valor nominal del esfuerzo sobre el brazo entre la muñequilla y el muñón.
- M_{1F} : momento relativo al brazo del cigüeñal.
- M_{max} : momento máximo del diagrama de momentos.
- M_{min} : momento mínimo del diagrama de momentos.
- S_{eqv} : modulo equivalente a la sección del brazo.
- S : espesor promedio del brazo.
- W : ancho máximo para del brazo.
- K : factor empírico por la influencia de los tiempos del motor.
- σ_F : esfuerzo sobre la zona del radio de acuerdo.
- α : factor de concentración.
- σ_e : esfuerzo equivalente máximo.
- σ_a : valor del esfuerzo añadido por el desalineamiento.

Tabla 3. Fuerza que actúa sobre el cigüeñal.

Dato	Valor
M_{max}	825,831628 Nm
M_{min}	0 Nm
S	10,9 mm
W	81,83 mm
K	1 (4 tiempos)
α	1,565
σ_a	10 MPa

(Fuente Propia)

$$\sigma_{1F} = \frac{M_{1F}}{S_{eqv}} \times 10^3 \frac{mm}{m} \times K$$

$$M_{1F} = \frac{1}{2} (M_{max} - M_{min})$$

$$S_{eqv} = \frac{W \times S^2}{6}$$

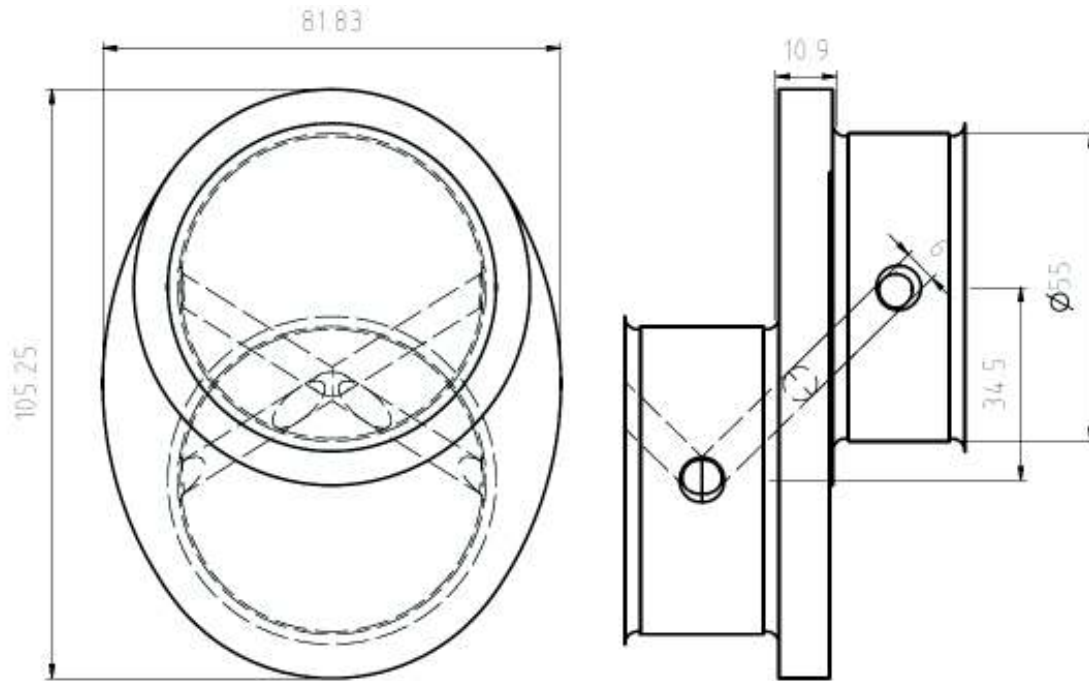


Figura 5. Dimensiones del cigüeñal en el área de fractura.

(Fuente Propia)

$$\sigma_{1F} = \frac{M_{1F}}{S_{eqv}} \times 10^3 \frac{mm}{m} \times K$$

$$M_{1F} = \frac{1}{2} (M_{max} - M_{min})$$

$$M_{1F} = \frac{1}{2} (826 - 0)$$

$$M_{1F} = 413 Nm$$

$$S_{eqv} = \frac{W \times S^2}{6}$$

$$S_{eqv} = \frac{81,83 \times 10,9^2}{6}$$

$$S_{eqv} = 1620 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{1F} = \frac{413 \text{ Nm}}{1620 \text{ mm}^3} \times 10^3 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 1$$

$$\sigma_{1F} = 255 \text{ MPa}$$

Con el valor nominal de esfuerzo sobre el brazo del cigüeñal se procede a calcular el esfuerzo sobre la zona del radio de acuerdo que se da usando el factor de concentración alfa que depende de las dimensiones del cigüeñal incluido el radio de acuerdo de este por lo cual este factor tabulado en la tabla 3, este es un factor adimensional que multiplica el esfuerzo nominal.

$$\sigma_F = \alpha \times \sigma_{1F}$$

$$\sigma_F = 1,57 \times 255 \text{ MPa}$$

$$\sigma_F = 399 \text{ MPa}$$

Para el cálculo del esfuerzo equivalente máximo se usa el esfuerzo sobre la zona del radio de acuerdo más 10 MPa debido al probable desalineamiento del sistema block, cigüeñal, bielas y pistones.

$$\sigma_e = \sigma_F + \sigma_a$$

$$\sigma_e = 399 \text{ MPa} + 10 \text{ MPa}$$

$$\sigma_e = 409 \text{ MPa}$$

El criterio de aceptación de cigüeñales presentado en el Blue Book (International Association of Classification Societies, 2017), da una relación entre el esfuerzo equivalente máximo calculado y el esfuerzo de fatiga el cual dice que debe ser mayor o igual a 1,15. La ecuación que establece la relación es la siguiente:

$$Q = \frac{\sigma_{diseño}}{\sigma_e}$$

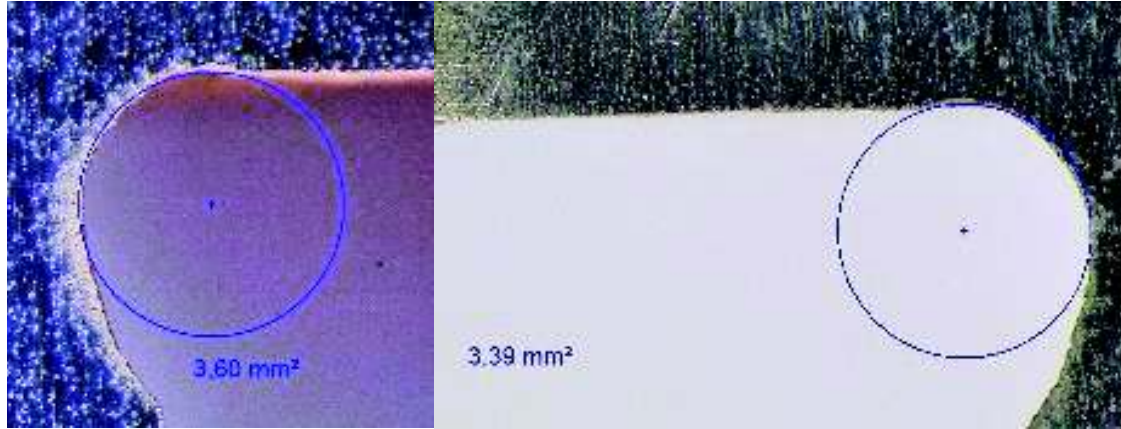
$$Q = \frac{283 \text{ MPa}}{409 \text{ MPa}}$$

$$Q = 0,69$$

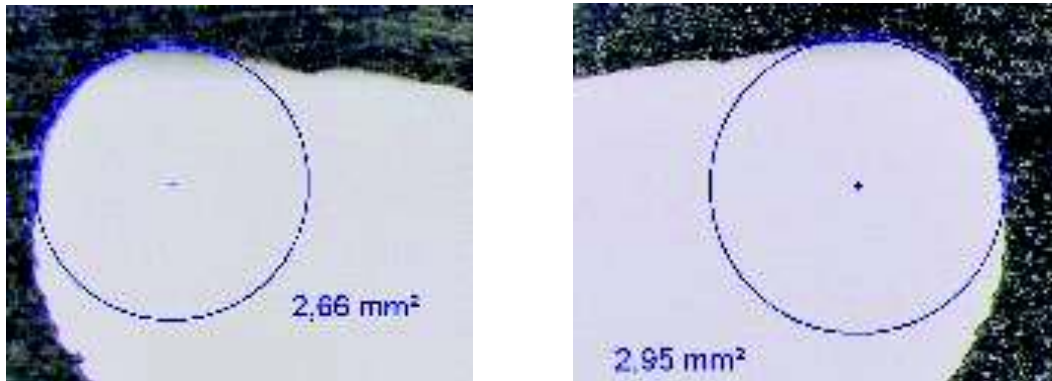
Esto demuestra que el cigüeñal no cumple con el criterio de aceptación presentado.

ANEXO 4.- Cálculo del radio de acuerdo

Este cálculo se realizará mediante la medición que fue tomada del área que ocuparía un círculo creado con este radio, que fue medida en las micrografías que se muestran en las figura 3.10 y figura 3.13.



a) b)
Figura 1. Radio de acuerdo cigüeñal C-V, a) lado uno, b) lado dos.
(Fuente propia)



a) b)
Figura 2. Radio de acuerdo cigüeñal C-N, a) lado uno, b) lado dos.
(Fuente propia)

Para simplificar el proceso se colocan los valores en la tabla 1.

Tabla 1. Datos para el cálculo de los radios de acuerdo

Área creada con el radio de acuerdo	
Cigüeñal C-V	Cigüeñal C-N
3.50 mm ²	2.66 mm ²
3.39 mm ²	2.95 mm ²

(Fuente propia)

Para el calcular el área de un círculo se tiene:

$$A = \pi \times r^2$$

Donde despejando el radio se tiene:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{3.50 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad r_2 = \sqrt{\frac{3.39 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{2.66 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad r_4 = \sqrt{\frac{2.95 \text{ mm}^2}{\pi}}$$

$$r_1 = 1.06 \quad r_2 = 1.04$$

$$r_3 = 0.92 \quad r_4 = 0.97$$

Para obtener los valores del radio de acuerdo para cada uno de los cigüeñales se realiza un promedio entre los valores obtenidos por las áreas. Los valores se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Radios de acuerdo

Área creada con el radio de acuerdo			
Cigüeñal C-V		Cigüeñal C-N	
r_1	1.06 mm	r_3	0.92 mm
r_2	1.04 mm	r_4	0.97 mm
R_{CV}	1.05 mm	R_{CN}	0.95 mm

(Fuente propia)

ANEXO 5.- Proceso de simulación Inventor

Una vez creado el modelo en programa Autodesk Inventor y guardado en formato IPT e IGES se procede a generar los componentes necesarios para la simulación. Empezando por presionar el botón de Stress Analysis en el programa Inventor.



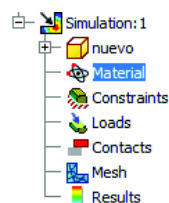
En el módulo de simulación se presiona el icono Create Simulation.



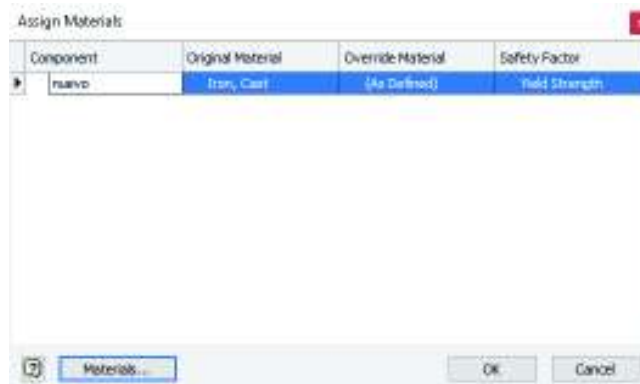
Se descubre el cuadro de dialogo Create Simulation en el cual se selecciona Static Analysis y se da OK



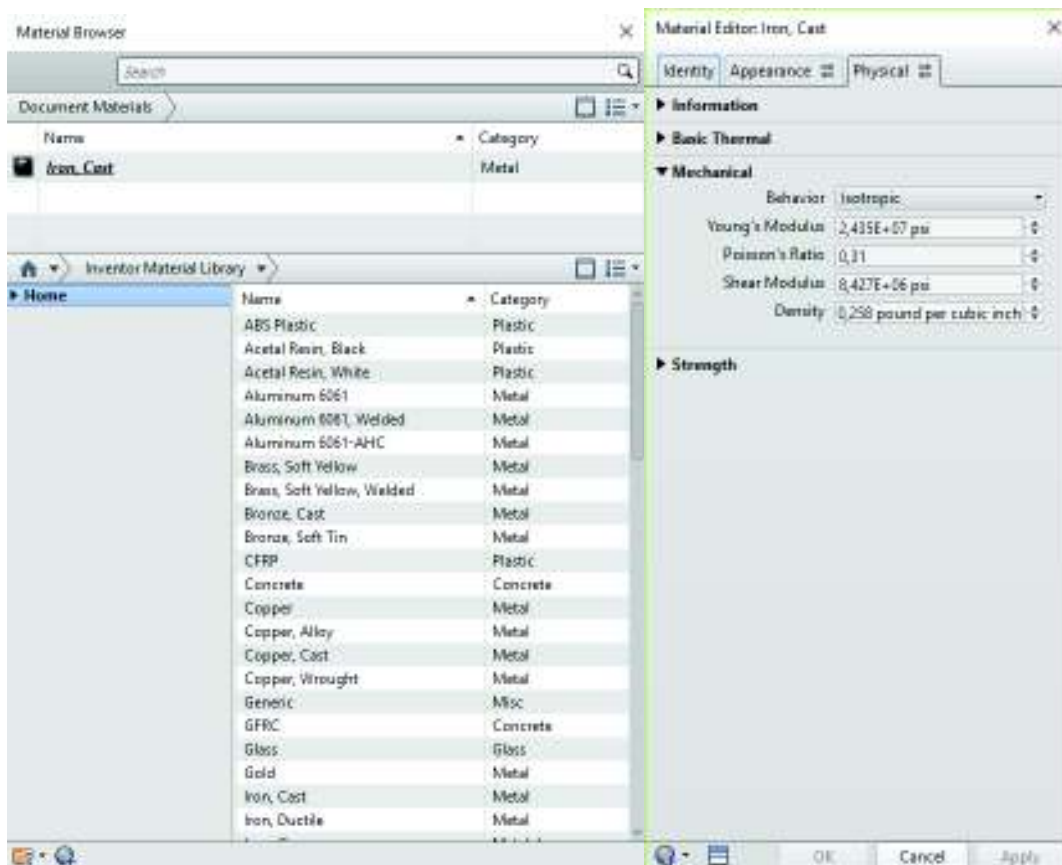
En el módulo de simulación aparece un nuevo menú en el cual se selecciona Material haciendo doble click sobre esta opción.



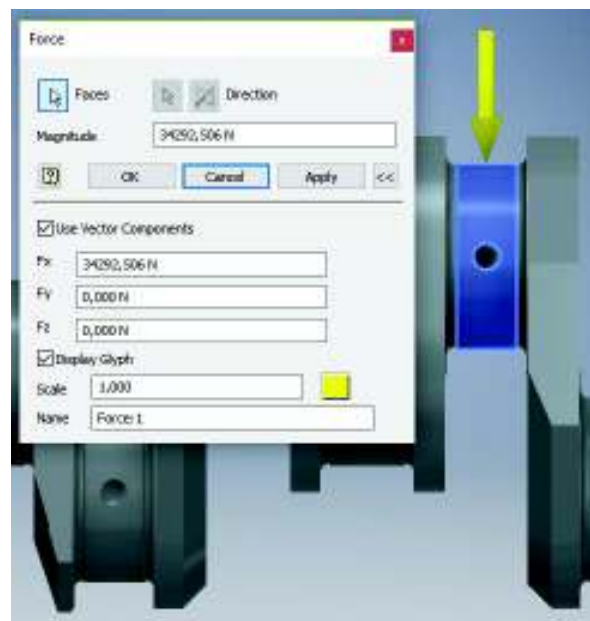
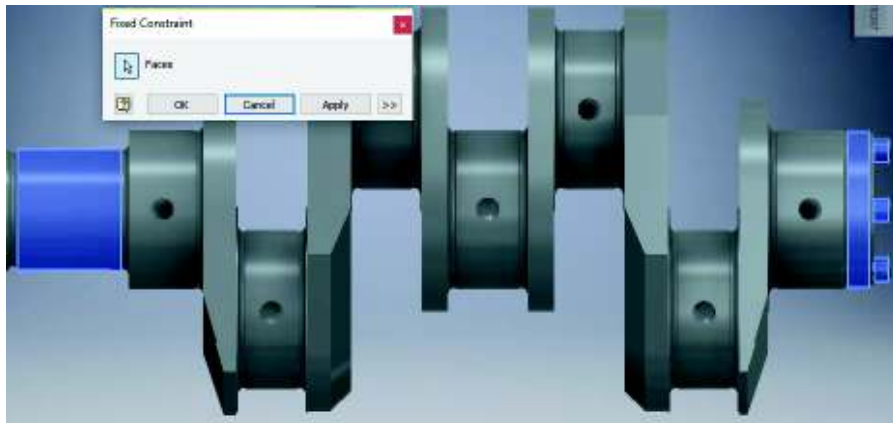
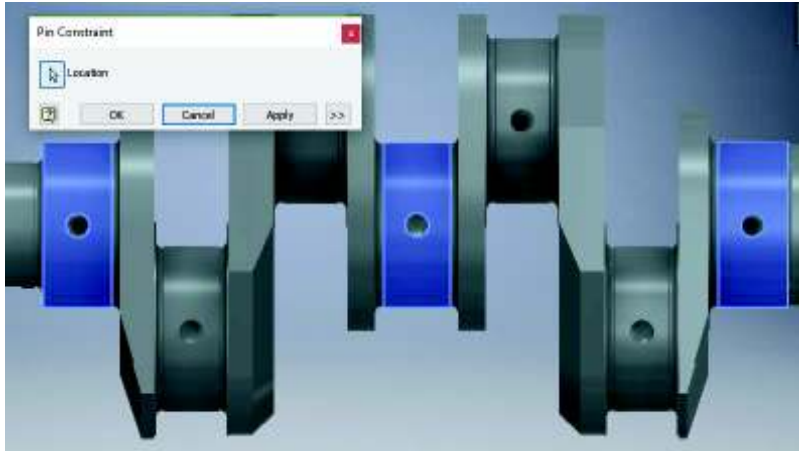
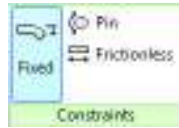
Con lo cual se abre el un cuadro de dialogo en el cual se puede seleccionar el material con el cual se va a realizar la simulación, o en su defecto crear un material con las propiedades para la simulación.



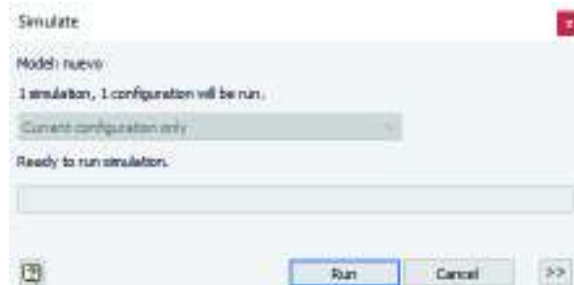
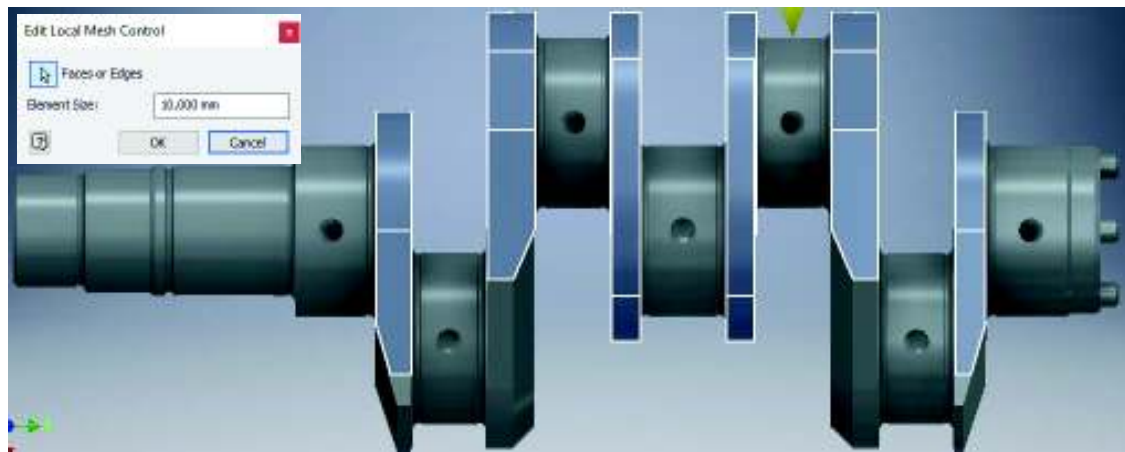
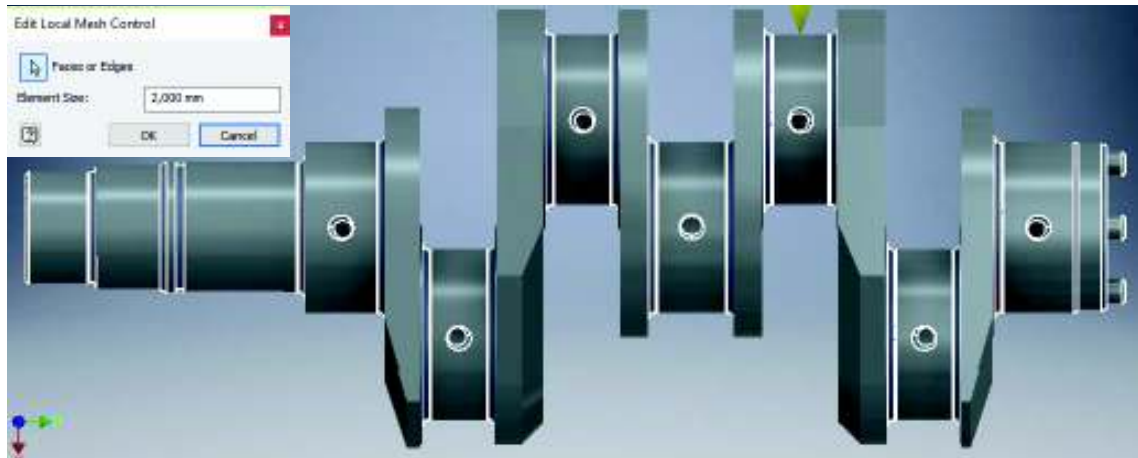
Se selecciona el botón Materials que se ubica en la parte inferior izquierda del cuadro de dialogo. Con el cual se despliega el otro cuadro de dialogo, Material Browser, en el cual se tiene una lista de todos los materiales de la biblioteca que tiene el programa. En el cual se puede seleccionar el material Iron Cast el cual puede ser modificado para colocar las propiedades tabuladas del material ASTM A536 80-55-06.



Se colocan las restricciones necesarias para la simulación como se muestra en la sección 2.6, colocando tres resecciones de Pin y dos de Fixed.

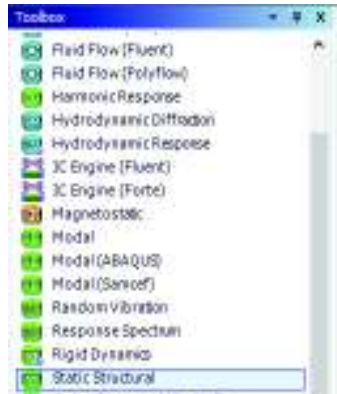


Se colocan la fuerza máxima calculada y se crea el mallado refinado para proceder a iniciar la simulación.



ANEXO 6.- Proceso de simulación ANSYS

Una vez creado el modelo en programa Autodesk Inventor y guardado en formato IPT e IGES, se abre el software ANSYS en el cual se selecciona y carga la herramienta de Static Structural del Toolbox para empezar el análisis. Después se selecciona Engineering Data, donde se crea un nuevo material, Cast Iron en el cual se colocan todas las propiedades necesarias y suficientes para realizar la simulación.

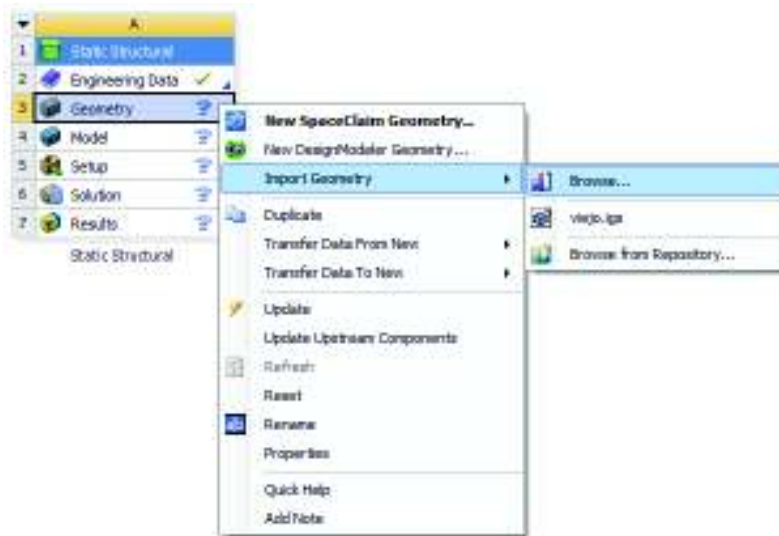


Outline of Schematic: A0: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	cast iron				
Click here to add a new material					

Properties of Outline Row 3: cast iron					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7,15	g cm ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulu...			
6	Young's Modulus	1,68E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,31			
8	Bulk Modulus	1,4737E+11	Pa		
9	Shear Modulus	6,4122E+10	Pa		
10	Tensile Yield Strength	3,62E+08	Pa		
11	Compressive Yield Strength	3,62E+08	Pa		
12	Tensile Ultimate Strength	5,59E+08	Pa		
13	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

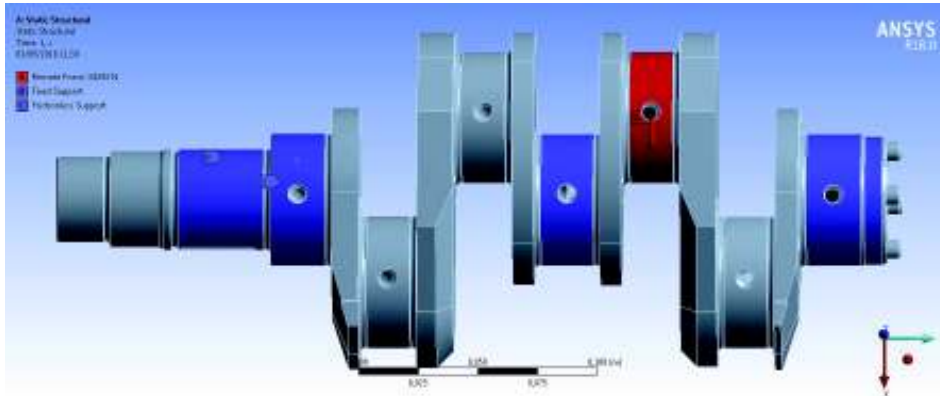
Después de crear el material con las propiedades del ASTM A536 80-55-06, se procede a importar la geometría del archivo IGES que fue guardado previamente en Autodesk

Inventor, en el módulo Static Structural se hace click derecho en la sección Geometry del menú, se procede a Import Geometry, Browse y aquí ubicar el archivo en formato IGES para importarlo.



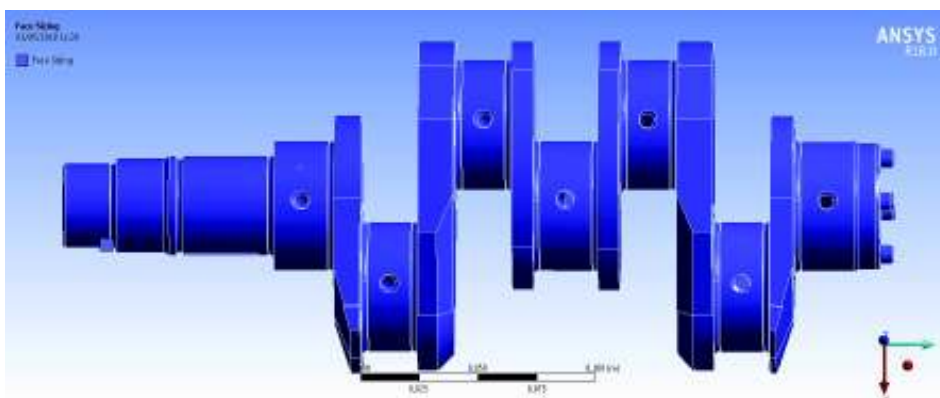
Luego se sigue a la sección Model del módulo donde se hace doble click para que aparezca la ventana en la cual se puede proceder a colocar todas las restricciones de las conexiones, soportes y fuerzas.

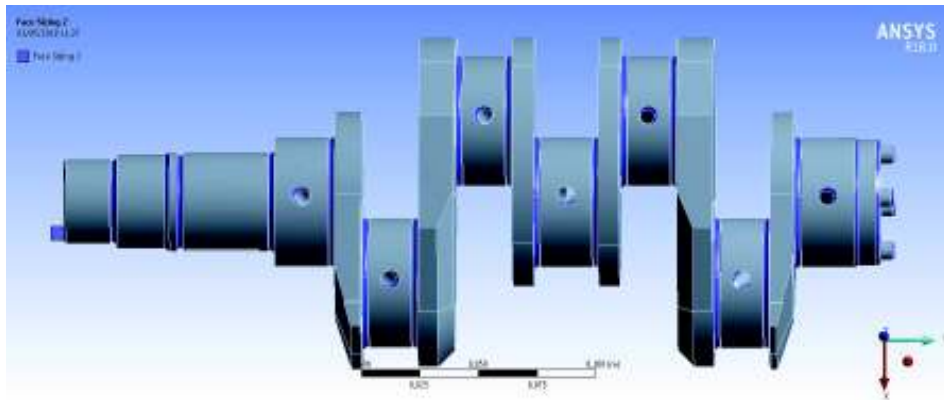




Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
X Coordinate	-3,4502e-002 m
Y Coordinate	-8,9399e-002 m
Z Coordinate	4,4633e-006 m
Location	Click to Change
Definition	
Type	Remote Force
Define By	Components
X Component	34293 N (ramped)
Y Component	0, N (ramped)
Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Advanced	

Para finalizar se crea un mallado refinado por caras sobre toda la superficie para poder colocar el gráfico de convergencia. El refinado se lo realizará en dos partes el uno un poco más amplio sobre toda la superficie y el segundo más fino sobre los sectores más estrechos del modelo.





ANEXO 7.- Análisis de nodularidad OLYMPUS Stream Essentials cigüeña C-V



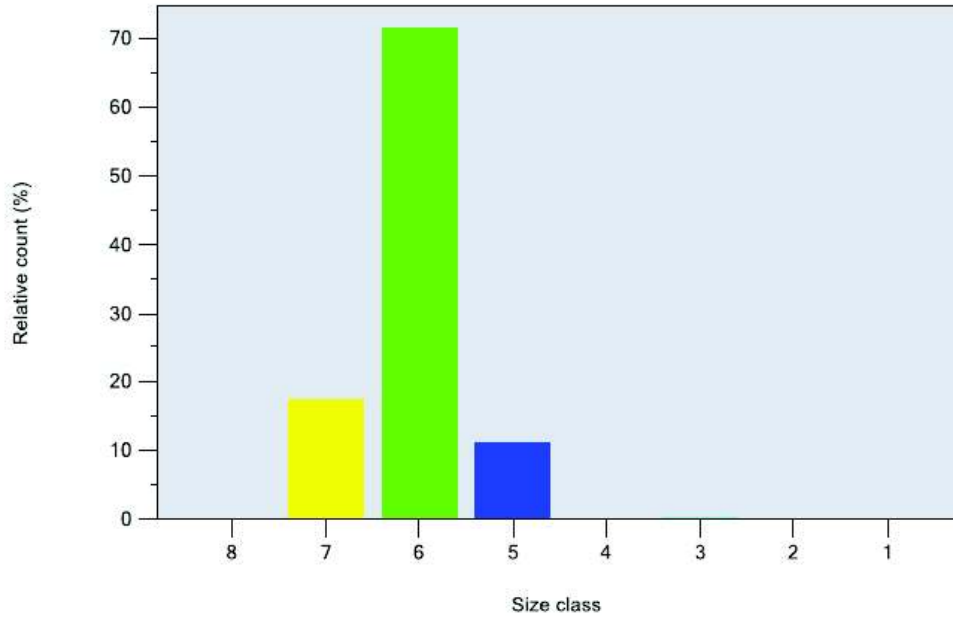
Stream Report

Cast Iron analysis (Summary)

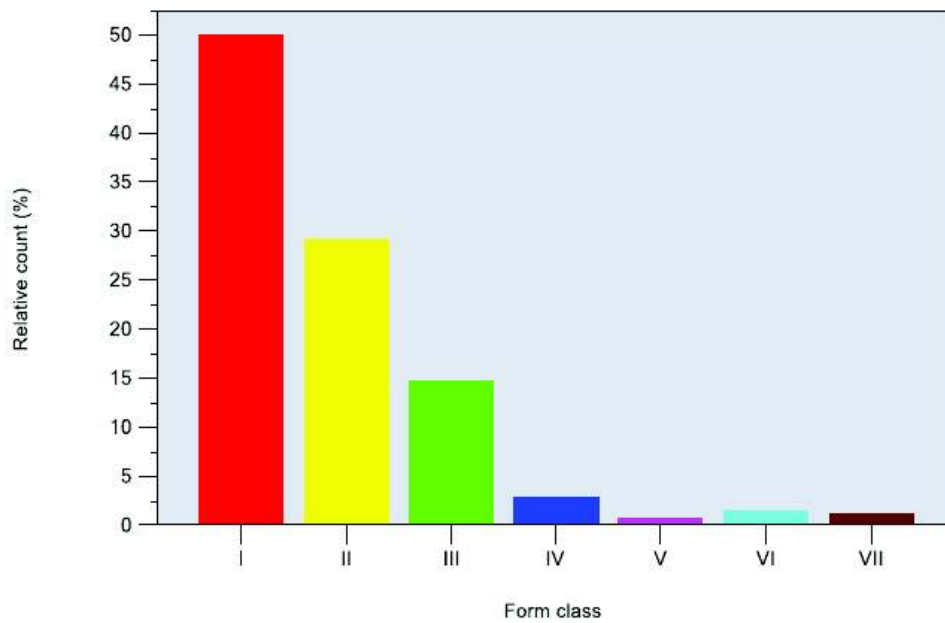
Standard	ASTM A 247-10		
Total Number of Images	1		
Total Sample Area	1.29 mm ²		
Unetched Sample Area	1.29 mm ²		

Cast Iron analysis (Sample Results)

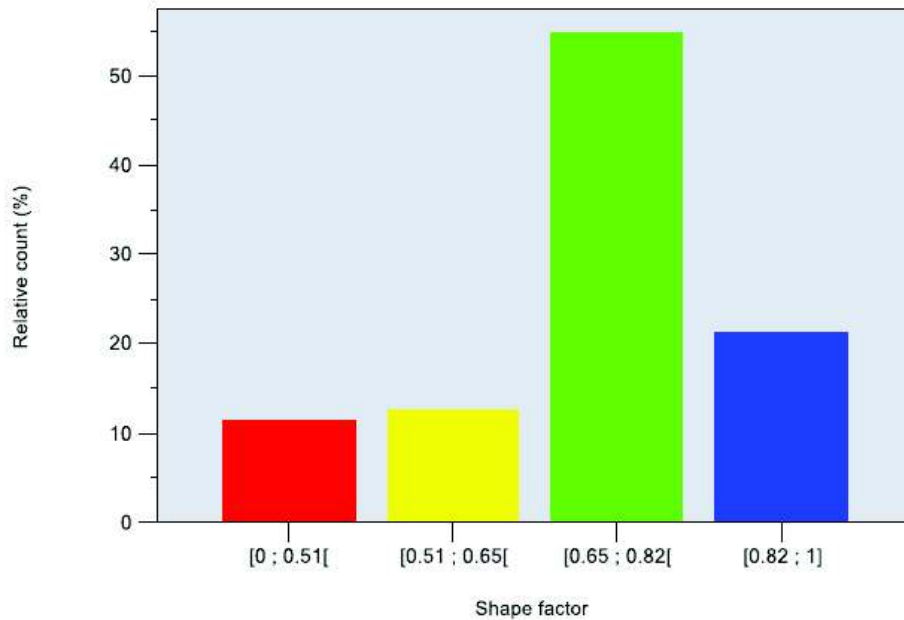
Sample 01 - Graphite Size



Sample 01 - Graphite Form



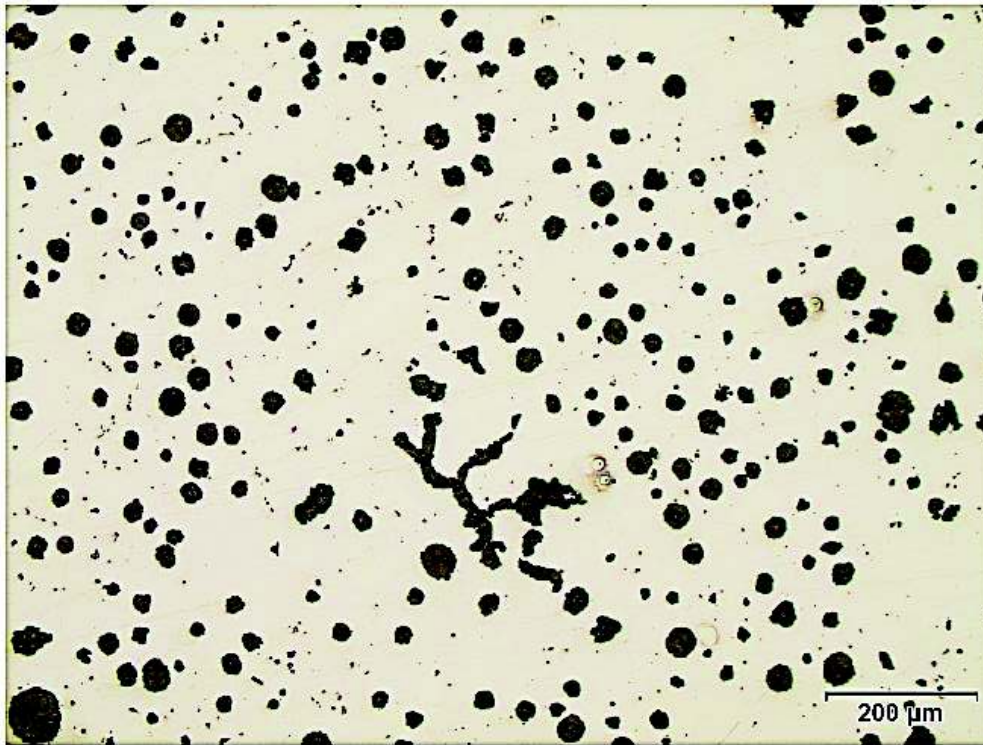
Sample 01 - Graphite Nodularity



Sample Results:

Reference	Cigüeñal Viejo
Group	
Sample Comment	
Date	25/10/2017 12:54:38
Standard	ASTM A 247-10
Standard 2	ASTM E2567-11
Total Number of Images	1
Total Sample Area	1.29 mm ²
Unetched Sample Area	1.29 mm ²
Graphite Fraction	11.5 %
Graphite Size	6
Graphite Form	I(53%) II(31%) III(16%)
Nodularity by Area (ASTM E2567)	86.1 %
Nodularity by Count (ASTM E2567)	89.4 %
Particles per mm ²	197.645
Nodular particles per mm ²	156.404

Cast Iron analysis (Image Results)



Sample Information:

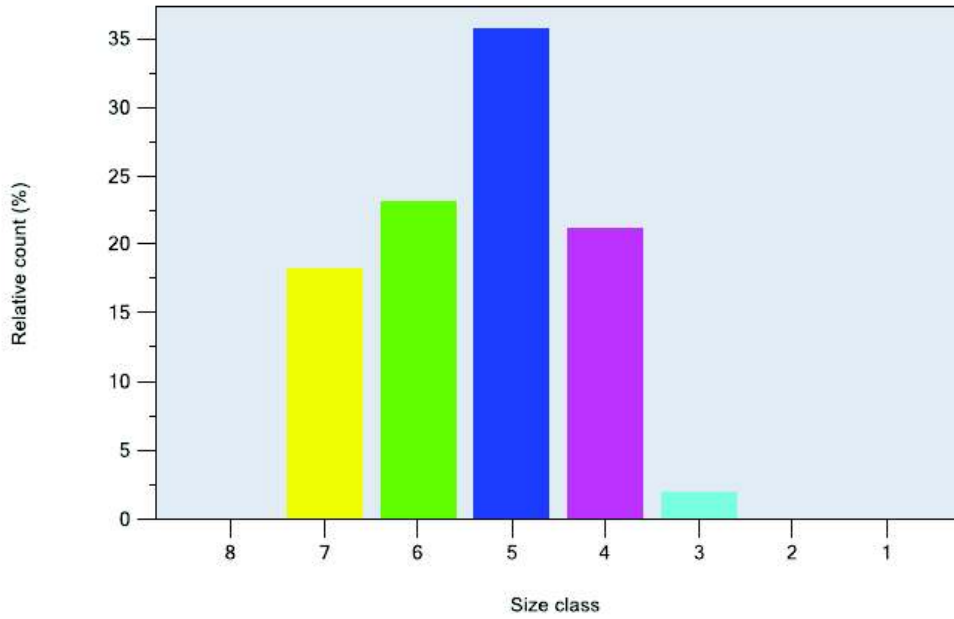
Reference : Cigüeñal Viejo
Group :
Sample Comment:

Image Results:

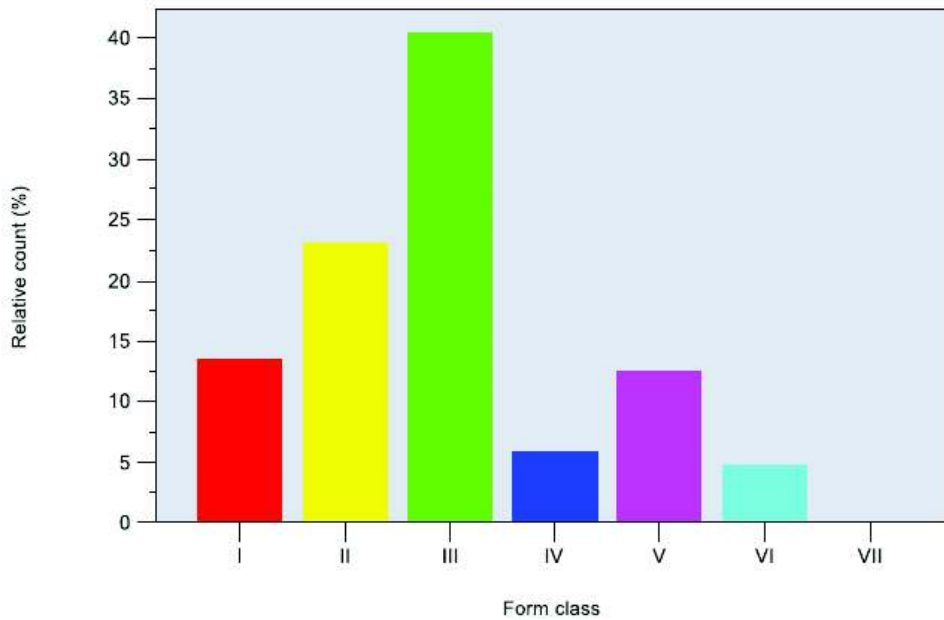
Image Comment:
Standard: ASTM A 247-10
Sample Type: Unetched
Graphite Form: II
Graphite Size: 6
Graphite Distribution:
Ferrite / Pearlite Ratio:
Graphite Fraction: 11.5 %
Graphite Particle Density: 197,64
Nodular Graphite Particle Density: 156,4
Graphite Nodularity:

Cast Iron analysis (Sample Results)

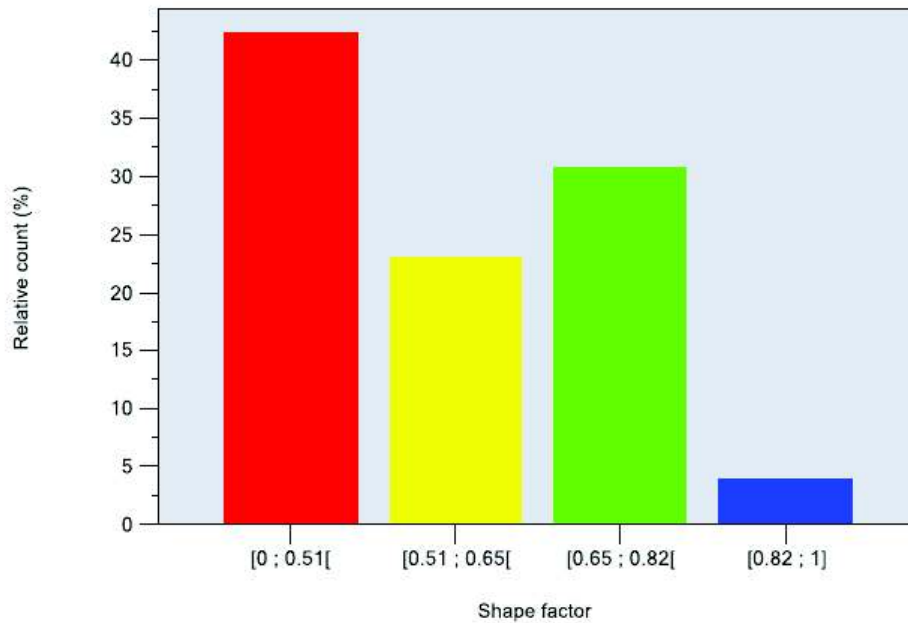
Sample 01 - Graphite Size



Sample 01 - Graphite Form



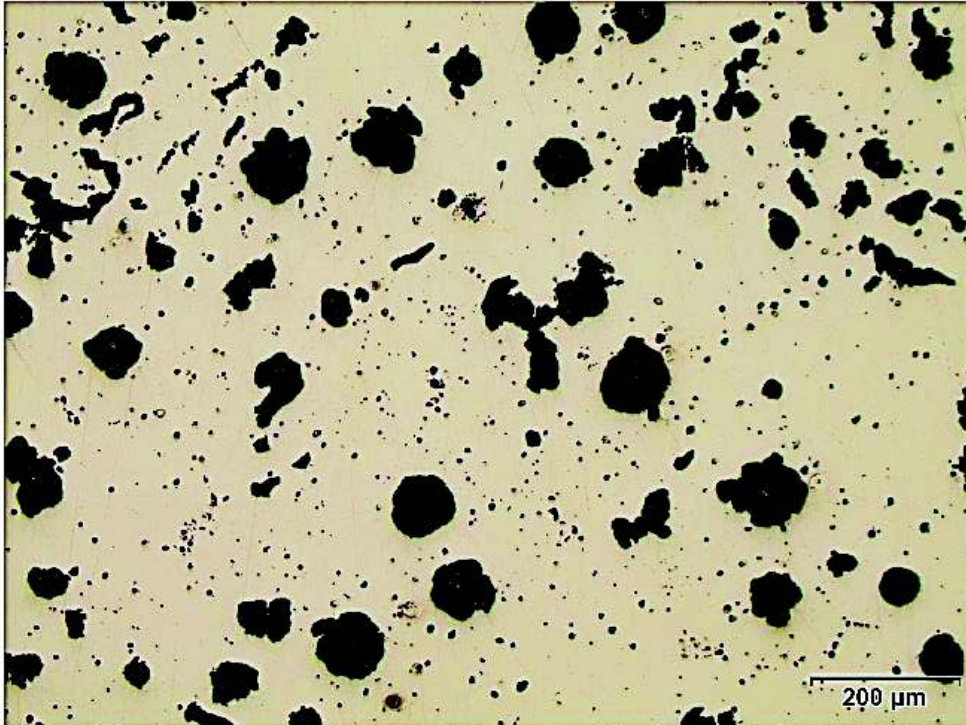
Sample 01 - Graphite Nodularity



Sample Results:

Reference	Cigüeñal Nuevo
Group	
Sample Comment	
Date	25/10/2017 13:12:08
Standard	ASTM A 247-10
Standard 2	ASTM E2567-11
Total Number of Images	1
Total Sample Area	1.29 mm ²
Unetched Sample Area	1.29 mm ²
Graphite Fraction	16.3 %
Graphite Size	4
Graphite Form	III(45%) II(26%) I(15%) V(14%)
Nodularity by Area (ASTM E2567)	63.7 %
Nodularity by Count (ASTM E2567)	58.7 %
Particles per mm ²	80.925
Nodular particles per mm ²	29.569

Cast Iron analysis (Image Results)



Sample Information:

Reference : Cigüeñal Nuevo

Group :

Sample Comment:

Image Results:

Image Comment:

Standard: ASTM A 247-10

Sample Type: Unetched

Graphite Form: III

Graphite Size: 4

Graphite Distribution:

Ferrite / Pearlite Ratio:

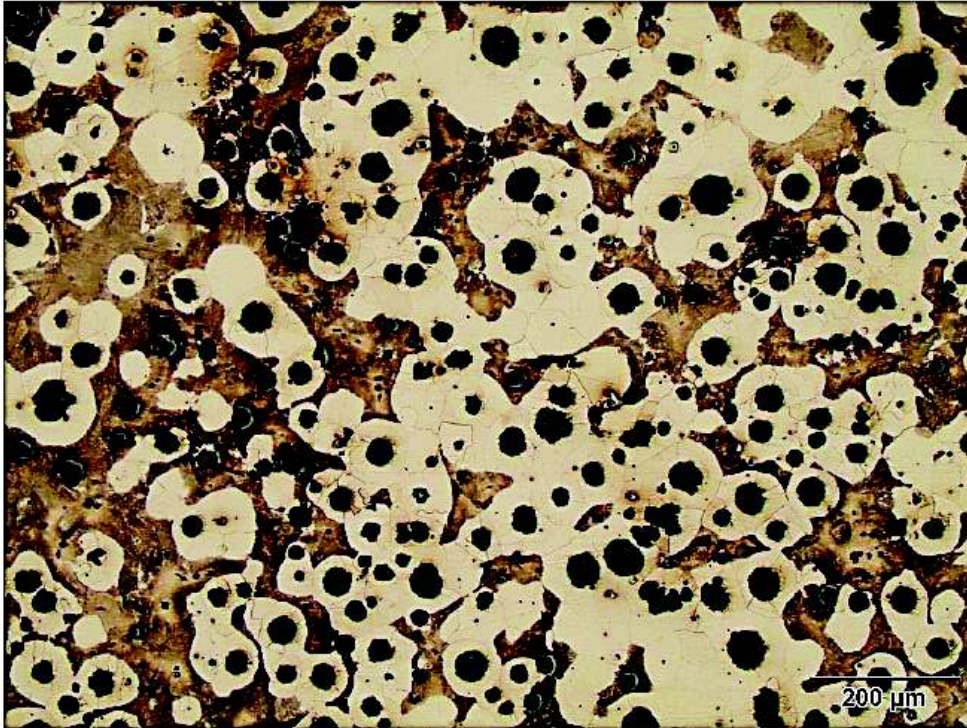
Graphite Fraction: 16.3 %

Graphite Particle Density: 80,93

Nodular Graphite Particle Density: 29,57

Graphite Nodularity:

Cast Iron analysis (Image Results)



Sample Information:

Reference : Cigueñal Viejo

Group :

Sample Comment:

Image Results:

Image Comment:

Standard:

Sample Type: Etched

Graphite Form:

Graphite Size:

Graphite Distribution:

Ferrite / Pearlite Ratio: 47.0% / 53.0%

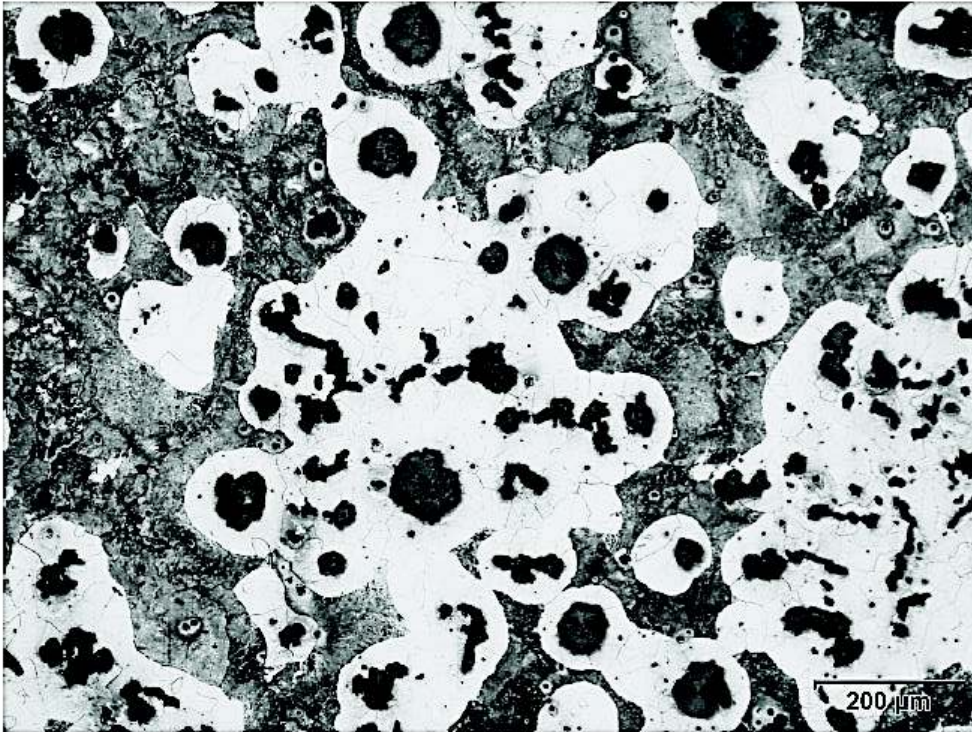
Graphite Fraction: 0.0 %

Graphite Particle Density:

Nodular Graphite Particle Density:

Graphite Nodularity:

Cast Iron analysis (Image Results)



Sample Information:

Reference : Cigüñal Nuevo

Group :

Sample Comment:

Image Results:

Image Comment:

Standard:

Sample Type: Etched

Graphite Form:

Graphite Size:

Graphite Distribution:

Ferrite / Pearlite Ratio: 40.2% / 59.8%

Graphite Fraction: 0.0 %

Graphite Particle Density:

Nodular Graphite Particle Density:

Graphite Nodularity: