# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Industrial y Procesos

Estudio de la influencia del tipo de arena en el llenado de un molde en arena verde, para la

fundición de un disco de freno, a través de la simulación CFD

Marco Vinicio Carrión Vargas

Nota del autor Marco Vinicio Carrión Vargas, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK. Directora Ing. Diana Belén Peralta Zurita, M.Sc. Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a: <u>mvcarrion.mdin@uisek.edu.ec</u>

### Declaración Juramentada

Yo, Marco Vinicio Carrión Vargas, con cédula de identidad 050179215-4, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Hange Hang for

MARCO VINICIO CARRIÓN VARGAS C.I.: 050179215-4

# Índice de contenido

Declaración Juramentada
Resumen
Palabras claves:
Abstract
Keywords:19
Introducción
Antecedentes
Planteamiento del problema25
Justificación
Hipótesis
Estado del arte
Proceso de fundición
Sistemas de moldeo
Moldeo en arena verde
Tipos de arenas de moldeo
Propiedades de las arenas de moldeo
Tecnologías de producción de discos de freno
Moldes de fundición de discos de freno41
Simulación CFD
Método

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	4
Selección de modelo de disco de freno	45
Modelo CAD disco de freno	
Dimensionamiento molde de fundición	
Ubicación de la línea de partición del molde	
Diseño de la geometría del bebedero	51
Diseño de la mazarota	
Modelo CAD molde de fundición	60
Caracterización de arenas de moldeo	
Simulación CFD	71
Procedimiento de simulación	76
Información de salida simulación CFD	
Validación	
Resultados	
Viscosidad de Eddy molde inferior	
Viscosidad de Eddy molde superior	
Presión molde inferior	
Presión molde superior	
Coeficiente de película molde inferior	
Coeficiente de película molde superior	
Discusión de resultados	144
Conclusiones	149
Recomendaciones	

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	5
Referencias	. 151
Anexos	. 160
Anexo 1 Registros tipo de ensayos laboratorio de arenas empresa Quintal S.A	. 160
Anexo 2 Resultados simulaciones disco de freno	. 166

# Índice de figuras

Figura 1 : Tipo de horno clientes Quintalec S.A.	21
Figura 2 : Tipo de moldeo clientes Quintalec S.A.	22
Figura 3 : Tipo de limpieza clientes Quintalec S.A	22
Figura 4. Producción mundial de fundición de hierro gris, hierro dúctil, y aceros (en m	illones
de toneladas	29
Figura 5. Clasificación del proceso de fundición por sistema de moldeo	31
Figura 6. Elementos de un molde desechable	32
Figura 7. Molde de fundición metálico o coquilla	35
Figura 8. Esquema de fundición por inyección a presión	35
Figura 9. Diagrama Fe – C metaestable	40
Figura 10. Moldeo de discos de freno en arena verde	42
Figura 11. Sistema de moldeo automático de discos de freno	42
Figura 12. Diagrama de flujo método de investigación	44
Figura 13. Modelo CAD disco de freno aveo Sonic 1.6 2012 - 2014	45
<i>Figura 14</i> . Dimensiones disco de freno aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	46
Figura 15. Ángulo de extracción modelo de fundición.	47
Figura 16. Modelo CAD disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012-2014 (Modelo)	48
Figura 17. Dimensiones modelo de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012-2014	48
Figura 18. Esquema molde de fundición unitario disco de freno	49
Figura 19. Esquema molde de fundición discos de freno en tándem.	49
Figura 20. Ubicación línea de partición molde disco de freno	51
Figura 21. Esquema bebedero	51
Figura 22. Propiedades físicas disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	53
Figura 23. Relaciones de cálculo pozo de alimentación	58

Figura 24. Bebedero molde de fundición disco de freno	. 59
Figura 25. Propiedades bebedero	. 60
Figura 26. Molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 - 2014	. 60
<i>Figura 27</i> . Molde inferior disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	. 61
Figura 28. Molde superior disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	. 61
<i>Figura 29.</i> Vista lateral molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	. 62
Figura 30. Sección A-A molde disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014	. 62
Figura 31. Dimensiones internas molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012	2 –
2014	. 63
Figura 32. Tamizador mecánico.	. 65
Figura 33. Curvas de % material retenido Laboratorio de Caracterización de arenas Quir	ıtal
S.A. Fuente: (Javier Rodríguez, 2020)	. 67
Figura 34. Clasificación de granos de arena de acuerdo a su forma	. 70
Figura 35. Densidad aparente arenas de moldeo	. 72
Figura 36. Herramienta "Iproperties" Inventor	. 73
Figura 37. Distribución de arena en la caja de moldeo	. 75
Figura 38. Sección transversal cajas de moldeo	. 75
Figura 39. Herramienta de apisonado (Pisón diámetro 10 cm)	. 76
Figura 40. Importación modelo CAD	. 77
Figura 41. Mallado 2D "Automesh"	. 78
Figura 42. Verificación mallado 2D "Mask"	. 79
Figura 43. Creación de componentes	. 79
Figura 44. Asignación de componentes molde inferior "Organize"	. 80
Figura 45. Asignación de componentes molde superior "Organize"	. 80
Figura 46. Creación de componentes "CFDtetramesh"	. 81

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	8
Figura 47. Verificación mallado 3D "Mask"	81
Figura 48. Verificación capa límite	82
Figura 49. Asignación de propiedades del fluido a la capa límite	82
Figura 50. Convergencia MID01	83
Figura 51. Convergencia MID02	83
Figura 52. Convergencia MID03	83
Figura 53. Convergencia MID04	83
Figura 54. Convergencia MID05	84
Figura 55. Convergencia MID06	84
Figura 56. Convergencia MID07	
Figura 57. Convergencia MID08	84
Figura 58. Convergencia MID09	84
Figura 59. Convergencia MID10	84
Figura 60. Viscosidad de Eddy MID01	85
Figura 61. Viscosidad de Eddy MID02	86
Figura 62. Viscosidad de Eddy MID03	86
Figura 63. Viscosidad de Eddy MID04	87
Figura 64. Viscosidad de Eddy MID05	87
Figura 65. Viscosidad de Eddy MID06	88
Figura 66. Viscosidad de Eddy MID07	88
Figura 67. Viscosidad de Eddy MID08	89
Figura 68. Viscosidad de Eddy MID09	89
Figura 69. Viscosidad de Eddy MID10	90
Figura 70. Presión MID01	91
Figura 71. Presión MID02	91

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	9
Figura 72. Presión MID03	92
Figura 73. Presión MID04	92
Figura 74. Presión MID05	
Figura 75. Presión MID06	
Figura 76. Presión CID07	94
Figura 77. Presión MID08	94
Figura 78. Presión MID09	95
Figura 79. Presión MID10	95
Figura 80. Coeficiente de película MID01	96
Figura 81. Coeficiente de película MID02	97
Figura 82. Coeficiente de película MID03	97
Figura 83. Coeficiente de película MID04	
Figura 84. Coeficiente de película MID05	
Figura 85. Coeficiente de película MID06	
Figura 86. Coeficiente de película MID07	
Figura 87. Coeficiente de película MID08	100
Figura 88. Coeficiente de película MID09	100
Figura 89. Coeficiente de película MID10	101
Figura 90. Convergencia MSD01	101
Figura 91. Convergencia MSD02	101
Figura 92. Convergencia MSD03	102
Figura 93. Convergencia MSD04	102
Figura 94. Convergencia MSD05	102
Figura 95. Convergencia MSD06	102
Figura 96. Convergencia MSD07	102

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	10
Figura 97. Convergencia MSD08	
Figura 98. Convergencia MSD09	
Figura 99. Convergencia MSD10	
Figura 100. Viscosidad de Eddy MSD01	
Figura 101. Viscosidad de Eddy MSD02	
Figura 102. Viscosidad de Eddy MSD03	
Figura 103. Viscosidad de Eddy MSD04	
Figura 104. Viscosidad de Eddy MSD05	106
Figura 105. Viscosidad de Eddy MSD06	106
Figura 106. Viscosidad de Eddy MSD07	
Figura 107. Viscosidad de Eddy MSD08	
Figura 108. Viscosidad de Eddy MSD09	
Figura 109. Viscosidad de Eddy MSD10	
Figura 110. Presión MSD01	
Figura 111. Presión MSD02	110
Figura 112. Presión MSD03	
Figura 113. Presión MSD04	
Figura 114. Presión MSD05	
Figura 115. Presión MSD06	
Figura 116. Presión MSD07	
Figura 117. Presión MSD08	
Figura 118. Presión MSD09	113
Figura 119. Presión MSD10	114
Figura 120. Coeficiente de película MSD01	115
Figura 121. Coeficiente de película MSD02	115

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	11
Figura 122. Coeficiente de película MSD03	116
Figura 123. Coeficiente de película MSD04	116
Figura 124. Coeficiente de película MSD05	117
Figura 125. Coeficiente de película MSD06	117
Figura 126. Coeficiente de película MSD07	118
Figura 127. Coeficiente de película MSD08	118
Figura 128. Coeficiente de película MSD09	119
Figura 129. Coeficiente de película MSD10	119
Figura 130. Diagrama Hierro – Carbono	
Figura 131. Modelo CAD discos de freno	
Figura 132. Mallado 2D generación de nodos "Automesh"	
Figura 133. Mallado 2D final	
Figura 134. Verificación mallado 2D "Mask"	
Figura 135. Creación de componentes	
Figura 136. Asignación de componentes "Organize"	
Figura 137. Mallado 3D "CFD Tetramesh"	
Figura 138. Asignación de propiedades capa límite "Organize"	
Figura 139. Solidificación rango de temperatura 1727 – 1706 °K	
Figura 140. Solidificación rango de temperatura 1706 – 1685 °K	
Figura 141. Solidificación rango de temperatura 1685 – 1663 °K	
Figura 142. Solidificación rango de temperatura 1663 – 1642 °K	
<i>Figura 143</i> . Solidificación rango de temperatura 1642 – 1620 °K	
Figura 144. Solidificación rango de temperatura 1620 – 1599 °K	
Figura 145. Solidificación rango de temperatura 1599 – 1577 °K	
Figura 146. Solidificación rango de temperatura 1577 – 1556 °K	

<i>Figura 147</i> . Solidificación rango de temperatura 1556 – 1535 °K 131
<i>Figura 148</i> . Curva de convergencia coeficiente de convección 3 J/m <sup>2</sup> *s*°K 132
<i>Figura 149</i> . Curva de convergencia coeficiente de convección 9 J/m <sup>2</sup> *s*°K
Figura 150. Curva de convergencia coeficiente de convección 18 J/m <sup>2</sup> *s*°K
Figura 151. Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 3 J/m <sup>2</sup> *s*°K
Figura 152. Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 9 J/m <sup>2</sup> *s*°K
Figura 153. Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 18 J/m <sup>2</sup> *s*°K
Figura 154. Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 3 J/m <sup>2*</sup> s*°K 136
Figura 155. Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 9 J/m <sup>2</sup> *s*°K 137
Figura 156. Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 18 J/m <sup>2</sup> *s*°K 137
Figura 157. Regresión simple Viscosidad de Eddy vs. Densidad molde inferior
Figura 158. Regresión simple Viscosidad de Eddy vs. Densidad molde superior
Figura 159. Regresión simple Presión vs. Densidad molde inferior
Figura 160. Regresión simple Presión vs. Densidad molde superior
Figura 161. Regresión simple Coeficiente de película vs. Densidad molde inferior
Figura 162. Regresión simple Coeficiente de película vs. Densidad molde superior
Figura 163. Relación entre pendientes viscosidad de Eddy146
Figura 164. Diferencia de perfiles de velocidad entre flujos viscosos (reales) y no
viscosos(ideales). Fuente (Rieutord, 2015) Modificado146

# Índice de tablas

Tabla 1. Empresas de Fundición de metales en el Ecuador	
Tabla 2. Valores deseables de arena verde	
Tabla 3. Tolerancias de contracción aleaciones metálicas en moldes de arena	47
Tabla 4. Peso de arena caja de moldeo tándem	53
Tabla 5. Cálculo de altura caja de moldeo	54
Tabla 6. Factor S para cálculo de tiempo de colada	54
Tabla 7. Cálculo de tiempo de colada y caudal de alimentación	55
Tabla 8. Cálculo del diámetro superior del bebedero	56
Tabla 9. Valores número de Reynolds según tipo de flujo	56
Tabla 10. Valores número de Reynolds según tipo de flujo	57
Tabla 11. Cálculo dimensiones pozo de alimentación	58
Tabla 12. Cálculo del volumen de la mazarota	59
Tabla 13. Descripción muestras de arena Laboratorio Quintal S.A.	65
Tabla 14. Análisis granulométrico según norma ASTM C136-01	66
Tabla 15. Cálculo índice de finura	68
Tabla 16. Clasificación de grados según el índice de finura IF	68
Tabla 17. Caracterización según grado	69
Tabla 18. Clasificación AFS de acuerdo al índice de finura	69
Tabla 19. Caracterización de muestras según AFS	69
Tabla 20. Densidad aparente arenas de moldeo	72
Tabla 21. Pesos de cajas de arena según densidad	73
Tabla 22. Caudal volumétrico de llenado	74
Tabla 23. Velocidades de llenado cajas de moldeo	76
Tabla 24. Nomenclatura de las simulaciones	

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD	14
Tabla 25. Composición química hierro gris	120
Tabla 26. Resultados Viscosidad de Eddy molde inferior	138
Tabla 27. Resultados Viscosidad de Eddy molde superior	139
Tabla 28. Resultados Presión molde superior	140
Tabla 29. Resultados Presión molde superior	141
Tabla 30. Resultados Coeficiente de Película molde superior	142
Tabla 31. Resultados Coeficiente de Película molde superior	143
Tabla 31. Coeficientes de correlación	144

# Índice de ecuaciones

Ec 1 Ecuación de Bernouli	
Ec 2 Ley de conservación de la energía	
Ec 3 Ecuación de Bernouli pérdidas por fricción igual a cero	
Ec 4 Movimiento caida libre	
Ec 5 Tiempo de colada	
Ec 6 Área del bebedero	
Ec 7 Número de Reynolds	
Ec 8 Volumen de la mazarota	
Ec 9 Índice de finura	
Ec 10 Flujo volumétrico	
Ec 11 Volumen en función del caudal y el área	
Ec 12 Presión	

# Índice de anexos

Anexo 1 Registros tipo de ensayos laboratorio de arenas empresa Quintal S.A	A160	
Anexo 2 Resultados simulaciones disco de freno	166	

# Abreviaturas

CFD	Computational Fluid Dynamics		
DIEE	Directorio de Empresas y Establecimientos		
CAD	Diseño asistido por computador (siglas en inglés)		
CAE	Ingeniería asistida por computador (siglas en inglés)		
QFD	Diseño para la calidad (siglas en inglés)		
FEM	Método de elementos finitos (siglas en inglés)		
ASTM	Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (siglas en inglés)		
IF	Índice de finura		
AFS	Sociedad Americana de Fundición (siglas en inglés)		
VE	Viscosidad de Eddy		
Р	Presión		
СР	Coeficiente de Película		
MI	Molde inferior		
MS	Molde superior		

#### Resumen

En el campo de la fundición de metales, se han realizado varios estudios tendientes a buscar una mejora en las propiedades de las mezclas de moldeo en arena verde, con el objetivo de reducir su impacto en la ocurrencia de defectos en los elementos finales, sin embargo, en dichos estudios la influencia del tipo de arena ha sido evaluada de manera indirecta. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la influencia del tipo de arena en el proceso de llenado de un molde de fundición, empleando simulación CFD Hyperworks de Altair, para un molde de discos de freno. La metodología partió del modelo CAD del disco de freno de un vehículo Chevrolet aveo Sonic 1.6 de los modelos entre los años 2012 y 2014, que según la empresa Fundimetales del Norte dedicada al mercado de piezas de reposición, tiene una alta demanda en el mercado. Un segundo elemento de entrada fueron los ensayos de arena provenientes del laboratorio de la empresa Quintal S.A. Posteriormente, se realizó la simulación del proceso de llenado de la arena al interior del molde, separado en un molde inferior y un molde superior. Como resultado se obtuvo las curvas de regresión simple que muestran la relación existente entre: la viscosidad de Eddy, la presión, el coeficiente de película, y, la densidad de la arena de moldeo. Para la validación se realizó la simulación del vertido del metal líquido en el molde de fundición, a partir de lo cual, como un aporte importante, se pudo obtener los perfiles de solidificación del disco de freno. Como conclusión del presente trabajo se determinó que el índice de finura de la arena de moldeo tiene una directa influencia en la presión de compactación, y, el carácter laminar del flujo de la arena al interior del molde.

## **Palabras claves:**

Simulación, molde, arena, viscosidad de Eddy, presión, coeficiente de película

#### Abstract

In the field of metal casting, several studies have been carried out to seek an improvement in the properties of molding mixtures for green sand molding, with the aim of reducing their impact on the occurrence of defects in the final elements, however in this studies, the influence of the type of sands has been indirectly evaluated. The present research work aims to evaluate the influence of the type of sand in the filling process of a casting mold, using Altair's Hyperworks CFD simulation for a break disc mold. The methodology started from the CAD model of the brake disc of a Chevrolet Aveo Sonic 1.6 vehicle of the models between years 2012 and 2014, which according to the company Fundimetales del Norte company dedicated to the parts market replacement, has a high demand in the market. A second input element was the sand tests from the laboratory of the Quintal S.A. company. Subsequently the simulation of the sand filling process was carried out inside the mold, separated into a lower and an upper mold. As a result, simple regression curves were obtained that show the relationship between: Eddy's viscosity, pressure, surface film coefficient, and the density of the molding sand. For the validation, the simulation of the pouring of the liquid metal into the casting mold was carried out, from which, as an important contribution, the solidification profiles of the brake disc were obtained. As a conclusion of the present work, it was determined that the fineness index of the molding sand has a direct influence on the compaction pressure, and the laminar nature of the flow of the sand into the mold.

### **Keywords:**

Simulation, mold, sand, Eddy's viscosity, pressure, surface film coefficient

# Introducción

#### Antecedentes

En la actualidad, la industria de la fundición en el Ecuador se encuentra en una etapa de desarrollo tecnológico, en la cual coexisten prácticas tradicionales de carácter artesanal con la innovación tecnológica de vanguardia. Según la información disponible en la base de datos del Directorio de Empresas y Establecimientos (DIEE) elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, en este ente gubernamental se encuentran inventariadas 173 empresas de fundición de metales distribuidos en tres grupos, como se muestra en la Tabla 1 (Imbaquingo y Andino, 2019).

Tabla 1.Empresas de Fundición de metales en el Ecuador

Cod. Sección	Cod. División	Clase	Cantidad
C24	C2410	Industrias básicas de hierro y acero	125
C24	C2431	Fundición de hierro y acero	27
C24	C2432	Fundición de metales no ferrosos	21
		Total	173

# Fuente: Directorio de Empresas y Establecimientos INEC 2018

Una muestra poblacional de este universo de industrias de fundición lo constituye el portafolio de clientes de la empresa Quintalec S.A., domiciliada en la ciudad de Quito y que se dedica al suministro de insumos y materias primas para el sector de la fundición. En un inicio el suministro de estos insumos era realizado desde la matriz Quintal Colombia, específicamente, y, a partir del año 2017 se lo realiza desde la sede local.

En la información que proporciona la base de datos de clientes de la empresa Quintalec S.A. actualizada al mes de marzo 2020, se puede evidenciar que en el país se encuentran talleres de fundición que utilizan la tecnología del horno de cubilote (14.29%), horno de crisol (45,71%), horno de arco eléctrico (8,57%), así como también, pequeñas y medianas empresas que han migrado hacia la tecnología del horno de inducción (31,43%) como se muestra en la Figura 1 (Carrión, 2020).



*Figura 1* :Tipo de horno clientes Quintalec S.A. Fuente: Base de datos clientes Quintalec\_marzo 2020

Específicamente en el proceso de moldeo sucede algo similar, ya que en el país se cuenta con un alto porcentaje (76.47%) de talleres, pequeñas y medianas empresas que realizan el proceso de moldeo en arena verde, y, también existe un menor número de empresas que realizan el proceso de moldeo con resinas y equipos automáticos de moldeo (17.65%), e incluso algunas cuentan con sistemas de inyección en línea (5.88%), como se muestra en la Figura 2 (Carrión, 2020).



*Figura 2* :Tipo de moldeo clientes Quintalec S.A. Fuente: Base de datos cliente Quintalec\_marzo 2020

Una tercera operación cuyo impacto toma importancia tanto en la calidad final de la pieza fundida, como en la estructura de costos de proceso de fundición con moldeo en arena verde, es la limpieza y pulido del elemento final. Un 72.5% de las empresas realiza esta operación de manera manual, un 10.0% mediante procesos de granallado. Requerimientos más específicos en determinados productos, como, por ejemplo, en el caso de la industria automotriz son obtenidos a través de procesos de maquinado (17.5%) (Carrión, 2020).



*Figura 3 :*Tipo de limpieza clientes Quintalec S.A. Fuente: Base de datos cliente Quintalec\_marzo 2020

### ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD

Una de las operaciones principales dentro del proceso de fundición es el moldeo, siendo el moldeo con arena el método de mayor aplicación a nivel mundial, y dentro de este el moldeo en arena verde el más común, mismo que consiste en la fabricación de moldes con una mezcla de dos componentes básicos, la arena y la bentonita, en presencia de agua como elemento aglutinante (García, 2013).

En relación a la influencia que tiene el tipo de arena en el moldeo en arena verde, en nuestro país se han realizado estudios que analizan: la influencia de las propiedades de las arenas en las piezas fundidas (Pallo y Valdivieso, 2018), mezclas alternativas de arena y el impacto en sus propiedades (Díaz, 2012), mezcla de moldeo óptimo para fundición de aluminio (Revelo, 2011), análisis del estado de producción de piezas fundidas, que incluye una revisión de los tipos de arena utilizados (Guamán y Oña, 2016).

Los trabajos de investigación realizados referentes a la influencia del tipo de arena, son coincidentes con la base teórica (Salueña y Nápoles, 2000) que establece que las propiedades requeridas en las arenas de moldeo son:

- ✓ Refractariedad
- ✓ Plasticidad
- ✓ Permeabilidad, y,
- ✓ Cohesión

En el Ecuador, el laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional realiza ensayos de arenas de fundición (Escuela Politécnica Nacional, 2020), sin embargo, y de acuerdo a los resultados de las investigaciones previas, este potencial no ha sido explotado, en primera instancia por los costos que supone para las industrias, y en segundo lugar por el carácter artesanal que aún se maneja en gran parte de este sector, de acuerdo a la información obtenida de la base de datos de clientes de la empresa Quintalec S.A. (Carrión, 2020). Por otra parte también se han realizado varios trabajos de investigación relacionados a la simulación computacional del llenado del metal líquido en el molde, como es el caso de simulación en fundiciones de aluminio (Garcés, 2016), uso del programa "Vulcan" para simular diferentes geometrías en fundición de aluminio (Huaca, 2011), simulación del proceso de fundición por gravedad de pesas de balanceo de neumáticos (Bazante, 2019), simulación del diseño de un molde permanente para fabricación de bornes de baterías (Jami, 2019).

Si bien en varios de los trabajos de investigación se han evaluado las implicaciones que puede tener el moldeo en arena verde en la calidad final de las piezas fundidas, estos análisis están realizados desde la perspectiva del flujo del metal líquido dentro del molde, más no del efecto que puede tener una variación en la composición de la arena de moldeo en la calidad superficial del elemento final.

Con estos antecedentes, este trabajo se enfoca específicamente en el estudio del comportamiento de los diferentes tipos de arena, en el llenado en la caja de moldeo, con la ayuda de la simulación computacional CFD (Computational Fluid Dynamics por sus siglas en inglés), a través del software Hyperworks de Altair en su módulo AcuSolve correspondiente al análisis CFD.

El software Hyperworks de Altair, en su módulo AcuSolve, permite realizar un amplio análisis de la dinámica de fluidos tano en estado estático como en estado transitorio, lo cual brinda la posibilidad de evaluar de una manera integral el comportamiento de la arena de moldeo como un fluido al interior de la caja de moldeo, a través de variables como la viscosidad de Eddy que evalúa el comportamiento laminar del fluido, los vectores de velocidades, y el rozamiento del fluido en la capa límite (Altair, 2019) (Rieutord, 2015).

#### Planteamiento del problema

Los estudios previos al presente trabajo de investigación se han enfocado al análisis del flujo del metal líquido dentro del molde, y las implicaciones del comportamiento, principalmente térmico, y sus efectos inducidos, en el proceso de solidificación. Este tipo de análisis no permite visualizar de manera directa los efectos de una determinada característica de la arena de moldeo, debido a las variables termodinámicas del flujo del metal que predominan ante cualquier desviación de las condiciones deseables del metal líquido (Pallo y Valdivieso, 2018; Díaz, 2012; Revelo, 2011).

Adicionalmente, y de acuerdo a lo expresado en el apartado de antecedentes, la importancia del presente trabajo de investigación, radica en el alto porcentaje de utilización del moldeo en arena verde (76.47%) en la industria de fundición en el Ecuador, lo que hace necesario el desarrollo de estudios que permitan la mejora de esta técnica de moldeo, a fin de obtener un beneficio técnico – económico para este sector.

Las principales hipótesis planteadas en los estudios previos, se pueden sintetizar en los siguientes enunciados:

- ✓ Los defectos de fundición se encuentran en estrecha relación con las características de las mezclas de moldeo (Pallo y Valdivieso, 2018).
- La calidad del elemento final depende no solamente de las propiedades de las mezclas de moldeo, sino que se ve afectada por factores externos, propios del comportamiento termodinámico, y, físico químico del metal líquido (García, 2013).
- Existe un desconocimiento de la composición de la arena de moldeo (Pallo y Valdivieso, 2018).

- ✓ La mejora en las propiedades de la arena verde, influye directamente en la reducción de defectos en el elemento final fundido (Díaz, 2012).
- ✓ En el Ecuador, específicamente en el laboratorio de fundición de la escuela Politécnica Nacional, se dispone de una base de datos de las arenas utilizadas en el medio local (Revelo, 2011).

En concordancia con las hipótesis planteadas, los resultados de los trabajos de investigación previos, han evaluado la influencia de la composición de las arenas de moldeo en las propiedades de los elementos finales fundidos, más no han evaluado el comportamiento de los tipos de arena en el conformado del molde.

En este sentido el presente estudio complementa las investigaciones previas enfocando su campo de acción en la simulación de diferentes escenarios de composición de la arena, a fin de estimar su influencia en la dinámica del fluido durante el llenado en el molde, para de esta manera proveer a las empresas de fundición una herramienta adicional al proceso de moldeo en arena verde.

En específico el análisis se centrará en el moldeo en arena verde de discos de freno tipo campana que son producidos por la empresa Fundimetales del Norte domiciliada en la ciudad de Tulcán.

### Justificación

A nivel mundial, se han realizado varios estudios tendientes a buscar una mejora en las propiedades de las mezclas de moldeo en arena verde, con el objetivo de reducir su impacto en los defectos que pueden ocurrir en los elementos finales obtenidos por fundición de metales, tales como sopladuras, porosidad y contracción (Said et al., 2018). Sin embargo en los estudios realizados no se vincula la caracterización de los tipos de arena con una herramienta de simulación computacional, considerando a la mezcla de moldeo en arena verde como un fluido

(Mais et al., 2014). A continuación, se citan algunas de las investigaciones llevadas a cabo, y cuál ha sido su orientación específica respecto al tema.

Entre los estudios más recientes se encuentra la investigación realizada por (Mais et al., 2014), en la cual mediante ensayos de laboratorio TNO y ORLOV se evalúa la influencia de las propiedades de la mezcla de moldeo, y la relación del grado de compactación con la dureza del molde, respectivamente, en la fluidez de la mezcla de moldeo.

La investigación realizada por Said et al., (2018), se enfoca en el desarrollo de un método de diseño de experimentos factoriales, con el objeto de optimizar la mezcla de arena, agua y elementos aglutinantes para reducir los defectos en los productos de fundición.

Otro de los campos de estudio que ha sido ampliamente desarrollado en cuanto a la optimización de las mezclas de moldeo en arena verde, es la proporción de material aglutinante y agua que debe ser añadida, tal como lo exponen en su estudio Saikaew y Wiengwiset, (2012).

En este contexto, han sido desarrollados estudios con el objeto de elaborar un modelo estadístico que permita predecir el comportamiento de las materias primas de las mezclas de moldeo (Kundu y Lahiri, 2008).

A nivel local, como se indicó en los antecedentes se han desarrollado varios estudios que buscan evaluar las propiedades de las mezclas de moldeo en arena verde, de manera indirecta desde la perspectiva de la calidad de la pieza final fundida (Pallo y Valdivieso, 2018; Díaz, 2012); en ninguno de estos casos se evalúa el comportamiento de la mezcla de moldeo, ni de manera experimental, ni a través de una simulación computacional.

Por otra parte, el uso de un software de simulación computacional CFD, se ha visto restringido al análisis del comportamiento del metal líquido dentro del molde (Huaca, 2011;

Garcés, 2016), más en ningún caso se ha evaluado a través de este tipo de herramienta el comportamiento de la mezcla de moldeo, y en específico de la arena al interior del molde.

Con estos antecedentes, el objetivo general del presente trabajo de investigación es: Evaluar la influencia del tipo de arena en el proceso de llenado de un molde de fundición, empleando simulación CFD Hyperworks de Altair, para la fundición de discos de freno.

Para la consecución del objetivo general, los objetivos específicos planteados en el presente trabajo de investigación son:

- Caracterizar diferentes tipos de arena de moldeo, a partir de la información disponible en el laboratorio de ensayos de arena de la empresa Quintal Colombia, para la generación de la información de entrada del fluido en la simulación CFD.
- Simular el llenado de la arena en un molde de discos de freno tipo campana, mediante el empleo de un modelo CAD del molde de fundición, para la obtención de las variables de comportamiento de la arena en la simulación CFD.
- Definir la influencia de cada tipo de arena de moldeo, mediante el análisis de los resultados obtenidos en la simulación CFD, para la optimización del proceso de moldeo en arena en verde de discos de freno.

### Hipótesis

A partir de la simulación CFD de la arena de moldeo como un fluido, basada en diferentes caracterizaciones de la misma, será posible definir un patrón de comportamiento de la arena en el proceso de llenado de moldes de fundición de un tándem de discos de freno, de manera que permita optimizar el proceso de moldeo en arena verde, tanto desde el punto de vista técnico como económico, generando un conocimiento científico que respalde esta actividad.

#### Estado del arte

### Proceso de fundición

El origen de la fundición de metales se remonta a los años 4000 A.C., época en la cual los seres humanos utilizaban la técnica de fundir metales para fabricar elementos ornamentales, y armas para la caza y pesca (Kalpakjian y Schmid, 2002).

El impacto de la industria de la fundición en la economía mundial puede ser abordado desde la óptica de innumerables indicadores económicos, sin embrago, uno de los más representativos es la producción mundial de hierro gris, hierro dúctil, y, acero fundido. Según las cifras mostradas por Büchner, (2016), para el año 2020 se tiene proyectada la producción de 92 millones de toneladas de estos materiales, siendo China quien lidera el mercado con más del 45% de la producción mundial. Estas cifras seguramente se verán afectada por los efectos de la pandemia del Covid-19. En la Figura 4 se muestran las cifras de la producción mundial de hierro gris, hierro dúctil, y aceros fundidos, como una muestra del tamaño de la industria de la fundición.



*Figura 4*. Producción mundial de fundición de hierro gris, hierro dúctil, y aceros (en millones de toneladas.

Fuente (Büchner, 2016)

El proceso se define como la transformación de un metal desde el estado sólido al estado líquido, por acción de una fuente generadora de calor, para posteriormente vaciarlo en un

recipiente (molde), en donde el metal líquido en su proceso de solidificación adquiere la forma de dicho recipiente. Este proceso se caracteriza por su alta flexibilidad para la producción de una amplia gama de piezas tanto en forma y tamaño, como en la diversidad de metales y aleaciones a ser producidas (Lampman, 2009).

Es importante destacar que el proceso de fundición implica una complejidad mayor a la estricta teoría metalúrgica del cambo de fase del metal líquido, y sus elementos de aleación, sino que implica un amplio espectro de variables de entorno, así como procesos de soporte (Campbell, 2015).

Es así que se puede afirmar que el proceso de fundición es un caso de un fluido multi-fase donde coexisten fluidos compresibles e incompresibles, que no llegan a mezclarse, y en donde se ven involucradas variables como por ejemplo: tensión superficial, transferencia de calor tanto conductiva como convectiva, y, entalpía, que usualmente en un sistema tradicional de fundición no son tomadas en cuenta (Teskeredžić et al., 2015).

En la última década la industria de la fundición a nivel mundial ha experimentado importantes avances tecnológicos, y ha sido objeto de múltiples estudios en diferentes ámbitos de los procesos involucrados. Dichos estudios han estado enfocados en temáticas tales como: la introducción de la impresión 3D y la manufactura aditiva en los sistemas de moldeo (Upadhyay et al., 2017), la aplicación de ingeniería inversa (Zhang et al., 2019), estudios experimentales de la inclusión de la nanotecnología para mejorar las propiedades de los materiales fundidos (Kaleicheva y Mishev, 2018), investigaciones en busca de mejorar las propiedades de las arenas de moldeo (Ajibola et al., 2015; Dobosz et al., 2017), control de la contaminación de la industria de la fundición (Zheng et al., 2020), uso de software CAE para la simulación de los procesos de solidificación de los metales fundidos (Hu et al., 2020) y de programas IT para el manejo de información y datos referentes a la producción (Malinowski et

al., 2013). Los más recientes estudios de la industria de la fundición, tienen como reto en su horizonte la industria 4.0 a través de la implementación de la fabricación adaptativa basada en el internet de las cosas IoT (Pandia et al., 2018).

En el caso específico de la fabricación aditiva y sustractiva, según Zheng et al., (2020) su implementación en la industria de la fundición consigue una reducción de las emisiones de carbono aproximadas de 20.78 y 4.82% con respecto a los métodos convencionales utilizados. De la misma manera la eficiencia productiva se incrementa a niveles del 92.66 y 92.39% respectivamente.

#### Sistemas de moldeo

Los sistemas de moldeo se constituyen en uno de los sub procesos fundamentales en la industria de la fundición. Debido a su peso, según Kalpakjian y Schmid, (2002), y como se muestra en la Figura5, los sistemas de moldeo clasifican al proceso de fundición en tres grandes grupos:

- ✓ Fundición con molde desechable
- ✓ Fundición con molde permanente
- ✓ Fundición de crecimiento de monocristales



*Figura 5.* Clasificación del proceso de fundición por sistema de moldeo. Fuente (Kalpakjian y Schmid, 2002)

En la fundición con molde desechable, destaca el moldeo con arena en sus diferentes variantes, sea arena verde, o moldeo con resinas, debido a la resistencia de las arenas a las elevadas temperaturas (López, 2011), y a su bajo costo en referencia a otras técnicas de fabricación de moldes desechables. En la figura 6 se muestran los componentes básicos de un molde desechable:

- ✓ Caja de moldeo superior
- ✓ Caja de moldeo inferior
- ✓ Molde superior
- ✓ Molde inferior
- ✓ Macho o núcleo



*Figura 6.* Elementos de un molde desechable. Fuente (López, 2011)

El presente trabajo de investigación se centra en los sistemas de moldeo desechable, específicamente el moldeo en arena verde, debido a que representa el caso mayoritario en la industria de la fundición en el Ecuador (Carrión, 2020). Sin embargo, a continuación, se realiza un barrido de la evolución tecnológica de los sistemas de moldeo en los últimos años.

En este sentido, varios trabajos de investigación se han realizado encaminados a determinar las propiedades de un determinado molde y su influencia sobre el metal fundido.

En los años 2015 y 2016 se vieron importantes avances en la elaboración de moldes de arena por impresión 3D, sin embargo, sus inicios tienen una historia de alrededor de 20 años según Thiel et al., (2017). Una de las principales ventajas de este tipo de moldeo es la posibilidad de fabricar núcleos de una sola pieza, lo que facilita tanto el sistema de producción como el acople en la caja de moldeo.

En particular la impresión 3D y la manufactura aditiva han incursionado en la fabricación de moldes de fundición, mediante la tecnología inyección del elemento aglutinante para la fabricación de moldes de arena a partir de un modelo CAD (Upadhyay et al., 2017). Este tipo de moldeo garantiza las propiedades deseables en un molde como permeabilidad, resistencia mecánica, y transferencia de calor, además de posibilitar la reproducción de manera rápida y precisa moldes con formas complejas.

Sama et al., (2020) en su reciente estudio potencian los beneficios del sistema de moldeo 3DSP (3D Sand Print) en la industria de fundición de Estados Unidos, desde la óptica de la personalización que permite este sistema de moldeo para la fabricación de partes y piezas de uso industrial tales como rodetes de turbinas e impulsores, con gran precisión y a bajo costo.

Cabe destacar que la impresión 3D de moles de arena aún depende en gran forma de las características de la arena de moldeo, y tiene como tarea pendiente el desarrollo de materiales aglutinantes amigables con el medio ambiente y las personas.

Otra tendencia tecnológica de reciente estudio, es la producción de moldes de espuma de poli estireno implantado (Ponomarenko et al., 2020), que proporciona características de alta permeabilidad al molde, y al igual que los moldes de arena fabricados por impresión 3D, posibilita la producción de moldes con formas complejas y variados espesores.

La simulación de procesos es otra de las líneas de investigación aplicada a los sistemas de moldeo de fundición con arena. (Iqbal et al., 2012) fundamentan su trabajo de investigación en la simulación computacional de compuertas de llenado al interior de los moldes, con el objetivo de reducir los defectos por variables como la presión y velocidad de llenado, así como el tiempo y la tasa de enfriamiento.

A nivel regional, González et al., (2015) en su trabajo investigativo, realizan un completo análisis de las técnicas utilizadas en el diseño y construcción de moldes y machos de arena para fundición de aluminio, sin embargo, su estudio abraca conceptos de aplicación general para varios metales, siendo una importante fuente de información técnica respecto a los sistemas de moldeo con arena.

En el campo de la fundición con molde permanente, destacan la fundición con coquilla o molde metálico Figura 7, y la fundición por inyección a presión Figura 8. Este proceso se caracteriza por posibilitar la fabricación de piezas de alta precisión dimensional, y con exigentes niveles de acabado superficial, además de caracterizarse por su orientación a la fabricación en serie (López, 2011).



*Figura 7.* Molde de fundición metálico o coquilla. Fuente: (López, 2011)



*Figura 8.* Esquema de fundición por inyección a presión. Fuente: (López, 2011)

En el Ecuador la fundición con molde permanente se encuentra en desarrollo, especialmente en la fundición de aleaciones de aluminio, para la fabricación de partes y piezas para cocinas y línea blanca en general, actualmente aproximadamente un 5.88% de las empresas de fundición en el país, se encuentran en este giro de negocio (Carrión, 2020).

#### Moldeo en arena verde

El moldeo en arena verde es el método tradicional por experiencia, y el más ampliamente utilizado en la industria de la fundición, por ejemplo, solo en Estados Unidos, el tercer mayor productor de fundiciones de hierro y aceros fundidos (Büchner, 2016), se producen 15 millones de toneladas de metales fundidos por medio de esta tecnología de moldeo (Kalpakjian y Schmid, 2002).

El moldeo en arena verde consiste en el vaciado del metal líquido, en un molde de arena aglomerado con bentonita y agua, y que no ha sido sometido a ningún proceso térmico de secado, por lo tanto, la mezcla de moldeo aún contiene un porcentaje de humedad al momento de interactuar con el metal líquido en el proceso de vaciado (Garcés, 2016).

En la elaboración de los moldes de arena que se utilizan para la obtención de piezas metálicas fundidas, es importante garantizar las propiedades adecuadas de la mezcla de moldeo, con el objetivo de evitar la ocurrencia de defectos en la pieza final fundida, por influencia de las propiedades de la mezcla de moldeo, y más en específico, de la arena. A nivel mundial, el tipo de arena de mayor uso es la arena de sílice (SiO2), sin embargo existen investigaciones que buscan materiales alternativos para la mezcla de moldeo (Bisbal et al., 2015).

#### Tipos de arenas de moldeo

Existen diversidad de tipos de arena que se utilizan a nivel global para la producción de moldes de fundición. Los principales tipos de arena que se ´pueden encontrar en el mercado son:

- Arena sílice
- Zirconita
- ➢ Cromita, y,
- Olivina (Guamán y Oña, 2016).

En el caso de la industria de la fundición en el Ecuador el tipo de arena más ampliamente utilizado es la arena sílice (SiO<sub>2</sub>) debido a sus excelentes propiedades de refractariedad (resistencia a altas temperaturas). Este tipo de arena se caracteriza por tener un contenido de
SiO<sub>2</sub> superior al 95%, lo que limita la presencia de óxidos metálicos, compuestos que afectan a la refractariedad de la arena (Pallo y Valdivieso, 2018).

#### Propiedades de las arenas de moldeo

En su mayoría los estudios del moldeo en arena verde se centran en las propiedades básicas de las arenas de moldeo como son:

- ✓ Permeabilidad
- ✓ Refractariedad
- ✓ Densidad
- ✓ Índice de finura (Vega, 2017)

Sin embargo existen recientes estudios que analizan la fluidez de la arena de moldeo, en función de su granulometría (Mais et al., 2014). En este caso se realizaron ensayos experimentales de laboratorio para determinar la relación entre el tamaño de grano de la arena y su grado de compactación, que beneficia la adaptación de la mezcla de moldeo a formas complejas.

En la Tabla 2 e muestran los valores deseables a obtenerse en la arena verde de moldeo (Vega, 2017).

Metal	Tamaño de piezas	%	Permeabilid ad	Resistencia a la	Número de Finura	% Arcilla	Tiempo de mezcla
		Humeda d	AFS	compresión en verde	AFS	AFS	min
Hierro gris	Grande > 200 kg	3,7% - 6 %	100 - 150	14 - 16	50 - 65	13 - 17	3 - 5
Hierro	Medianas 40 - 200 kg			13 – 16	60 - 80		
nodular	Pequeñas < 40 kg			8-16	95 - 120		

Tabla 2. Valores deseables de arena verde

Fuente (Vega, 2017)

Por otra parte, la industria automotriz es uno de los segmentos de mercado que mayor demanda genera a la industria de la fundición, tanto en volumen de producción como en calidad de los elementos finales, especialmente en lo referente a elementos del sistema de combustión (Vasková et al., 2020), para lo cual se ha visto la necesidad de generar mezclas de moldeo en arena verde que permitan mejorar los niveles de precisión, a través de la incorporación de aglutinantes inorgánicos (Vasková et al., 2020).

Precisamente el presente trabajo de investigación aborda el segmento de mercado de piezas de fundición para la industria automotriz, en otro de sus componentes claves, por su implicación de seguridad, como son los sistemas de freno. Específicamente en lo referente a la fundición en hierro gris de discos de freno, que, debido al nivel de desarrollo tecnológico de la industria de la fundición en el Ecuador, aún se fabrican con el sistema de moldeo en arena verde (Carrión, 2020).

#### Tecnologías de producción de discos de freno

Al hablar de seguridad en un vehículo, el sistema de frenos es un conjunto que debe responder de forma segura, ágil y estandarizada, ante cualquier requerimiento del conductor, y para ello su diseño debe contemplar todos los aspectos relacionados con materiales, geometría, peso, fricción, transferencia de calor, entre los principales, de manera que su operación sea absolutamente predecible (García-León et al., 2018).

El sistema de frenos, y en particular los discos de freno, como parte del conjunto, basan su funcionamiento, en la ley de la conservación de la energía, transformando la energía cinética del vehículo producto de su velocidad, en energía calórica que se produce por la fricción entre el disco de freno y la pastilla (Lorenzo, 2018).

Según García-León et al., (2018) "el 70% de la energía cinética del vehículo es absorbida por los frenos delanteros que son de disco, y el restante 30% por los frenos traseros, que son de tambor" de ahí la importancia en el correcto diseño y dimensionamiento de los mismos.

En el mundo se estima que se producen alrededor de 6'500.000 toneladas de discos de freno al año, cifra que no considera el mercado de piezas de recambio que se producen alrededor del mundo de manera semi industrial, o que no están ligados a un sistema comercial integrado (Disagroup, 2014)

En lo que respecta a materiales, el hierro gris con grafito laminar en su matriz, es el material de mayor uso para la fabricación de discos de freno, debido a que el grafito laminar provee al material de excelentes propiedades de resistencia mecánica y transferencia de calor, requisitos fundamentales en un sistema de frenado (Arroyo, 2012).

La utilización del hierro gris para la producción de discos de freno se justifica debido a su bajo costo comparado otros materiales, la facilidad de fabricación que ofrece el proceso de fundición, y, la estabilidad de las propiedades mecánicas que ofrece ante los requerimientos de uso del sistema de frenos (R. Jiménez, 2011).

Químicamente la estructura del hierro gris está constituida por dos fases: la fase base o matriz que corresponde al hierro, pudiendo ser este ferrítico, perlítico, o, ferrítico-perlítico dependiendo de su contenido de carbono, y, una segunda fase dispersa correspondiente al carbono que se ubica en los intersticios de la matriz de hierro en forma de láminas de grafito (R. Jiménez, 2011).

En el diagrama hierro carbono, las fundiciones de hierro gris se encuentran entre el 2.5% y el 4.0% de contenido de carbono (eje - X), con temperaturas de fusión que van desde los 1300°C a los 1150 °C respectivamente, como se muestra en la Figura 9 (Pero-Sanz Elorz et al., 2018).



*Figura 9.* Diagrama Fe – C metaestable. Fuente: (Pero-Sanz Elorz et al., 2018) Modificado

En cuanto a innovación tecnológica, basados en la premisa de la ley de conservación de la energía, como el principio fundamental de funcionamiento del sistema de frenos de un vehículo, Lorenzo, (2018) basa su estudio en la optimización topológica de la geometría de un disco de freno, con el objeto de reducir el peso del elemento, y maximizar la transferencia de calor a través de la geometría de ventilación del disco de freno.

Otro aspecto de gran atención para la investigación del diseño y producción de piezas automotrices fundidas, y dentro de estas de discos de freno, es la optimización en el consumo de energía, tanto de manera directa en el proceso de fundición de la chatarra metálica, como en el desperdicio de energía en el proceso de solidificación y enfriamiento dentro del molde. Este tema en particular lo abarcan Wang et al., (2012), concluyendo que para lograr este objetivo es

necesario la implementación de sistemas de modelado avanzados, y el uso de tecnología informática.

En el campo de diseño de discos de freno, existen estudios que implementan el diseño robusto QFD (Quality for Design por sus siglas en inglés) que parten de un modelo idealizado abstracto, hasta la conceptualización de un modelo factible e industrialmente viable (C. Jiménez y Medina, 2012).

#### Moldes de fundición de discos de freno

Los sistemas de producción de moldes de fundición de discos de freno, presentan una amplia gama de soluciones, que van desde el moldeo en arena verde, el moldeo con elementos aglutinantes (resinas) (Norte, 2020), hasta modernos y complejos sistemas de moldeo automáticos como los utilizados en los sistemas de producción "flaskless" que permiten el moldeo de múltiples unidades en sistemas de moldeo vertical y horizontal, que brindan altos rangos de productividad, y elevados estándares de calidad superficial y tolerancia dimensional (Disagroup, 2014).

En el Ecuador, para la producción de discos de freno, aún predomina el sistema de moldeo en arena verde, en virtud que el mercado está direccionado al suministro de piezas de recambio, y no a una producción en serie para el abastecimiento de la industria automotriz (Norte, 2020).

En las Figuras 10 y 11 se pueden apreciar los sistemas de moldeo: en arena verde, y, moldeo automatizado.



*Figura 10.* Moldeo de discos de freno en arena verde Fuente: Pinterest



*Figura 11*. Sistema de moldeo automático de discos de freno Fuente: (Disagroup, 2014)

# Simulación CFD

La constante búsqueda de las industrias de la fundición, de la mejora en la calidad de sus productos, y de la consiguiente reducción en los defectos de sus piezas fundidas, han posicionado al diseño asistido por computador como una de las principales herramientas para la mejora continua del proceso de diseño. A través del uso de las simulaciones CFD, se puede conseguir no solo una mejora en la calidad final de las piezas fundidas, sino que permite una optimización de los costos de transformación, así como del tiempo de producción, lo que se refleja en un incremento de la productividad de las industrias que han implementado este tipo de tecnología de diseño (Iqbal et al., 2012).

Desde otro punto de vista, en el entorno de la tecnología de discos de freno, la simulación CFD es aplicada para la simulación de transferencia de calor por convección entre la superficie del disco de freno, y el aire que circula por los canales de ventilación, a fin de garantizar que la temperatura del disco no interfiera en la función de frenado. El trabajo de investigación de (S. Manavalan, Aswin Gopi, J. Arivarasu, 2019) se basa en este tipo de análisis a través del software ANSYS para un disco de freno cerámico.

Las diferencias en el comportamiento termo mecánico entre un disco de freno sólido, y uno ventilado han sido ampliamente analizados con la ayuda de la simulación CFD, siempre enfocada al estudio de transferencia de calor de tipo convectivo entre la superficie del disco y el aire circundante (Belhocine y Afzal, 2019).

Esteban et al., (2012) en su trabajo de investigación, que la aplicación de la ingeniería asistida por computador, en el diseño de discos de freno, por su alta implicación de seguridad, requiere de la conjunción de varias técnicas por separado, es decir se debe realizar en primera instancia un análisis de dinámica de fluidos CFD, que luego debe ser validado por un análisis de elementos finitos FEM, y, el resultado del diseño debe contemplar los insumos de las dos simulaciones.

Un punto importante a tomar en cuenta en el desarrollo del proceso de simulación CFD, es la correcta realización del mallado del modelo CAD, ya que esta operación juega un rol protagónico en la exactitud y estabilidad de los cálculos numéricos del método de elementos finitos, que se ven afectados por propiedades de la malla como: densidad y distribución de los nodos, suavidad, esquinamiento u oblicuidad, y, la relación de aspecto entre las principales (Samuel Gómez, 2017). De una adecuada selección de los elementos de malla, dependerá la fiabilidad de los resultados obtenidos.

#### Método

La metodología del presente estudio se basa en la utilización de herramientas computacionales de diseño, CAD, CAE, FEM, CFD, para simular el proceso de llenado de la arena en un molde de fundición de arena verde, correspondiente a la producción de discos de freno orientados al mercado de piezas de reposición o repuestos.

En síntesis, el método de investigación se esquematiza en el diagrama de procesos mostrado en la Figura 12.



Figura 12. Diagrama de flujo método de investigación

## Selección de modelo de disco de freno

En el Ecuador se fabrican discos de freno en fundición de hierro gris, mediante los métodos de moldeo en arena verde, y, moldeo con resinas autofraguantes o con secado utilizando CO<sub>2</sub> (Norte, 2020).

El mercado de discos de freno en el Ecuador está dirigido a la producción de repuestos de modelos que no se encuentran con facilidad en el mercado, es decir que no pueden ser adquiridos en las empresas dedicadas a la importación y comercialización de este tipo de repuestos.

Este es el caso del disco de freno delantero de 4 perforaciones ventilado, del vehículo Chevrolet aveo Sonic 1.6 de los modelos comprendidos entre los años 2012 y 2014, que según la información proporcionada por la empresa Fundimetales del Norte es uno de los de mayor demanda en el mercado local (Norte, 2020).

Con base a la información citada en el párrafo anterior, el modelo CAD del disco de freno objeto del presente estudio, y sus principales dimensiones, se muestra en las Figuras 13 y 14 respectivamente.



Figura 13. Modelo CAD disco de freno aveo Sonic 1.6 2012 - 2014



Figura 14. Dimensiones disco de freno aveo Sonic 1.6 2012 - 2014

## Modelo CAD disco de freno

En la figura 14 se muestra el modelo CAD con las dimensiones y geometría final del disco de freno, sin embargo, en el proceso de fundición se debe considerar las siguientes restricciones:

- a) No es posible obtener las perforaciones donde se alojarán los pernos de sujeción del disco de freno.
- b) De manera general las aleaciones metálicas, experimentan un proceso de contracción durante el proceso de solidificación, en el caso de la fundición gris, que es el objeto de estudio del presente trabajo, este material presenta una expansión de aproximadamente el 2.5%, debido a la precipitación de los nódulos de grafito (Joaquín Rodríguez, 2017). Sin embargo, en la práctica de la fundición de discos de freno, se adopta un % de contracción del 0.8% debido al proceso posterior de maquinado al que es sometido la pieza fundida (Norte, 2020). En la Tabla 3 se muestran los valores de los % de contracción de algunas aleaciones metálicas obtenidas por el proceso de fundición en moldes de arena.

Aleación	%	
Hierro fundido gris	0.83 - 1.3	
Hierro fundido blanco	2.1	
Hierro fundido maleable	0.78 - 1.0	
Aleaciones de aluminio	1.3	
Aleaciones de magnesio	1.3	
Latón amarillo	1.3 - 1.6	
Bronce fosfórico	1.0 - 1.6	
Bronce al aluminio	2.1	
Acero al manganeso	2.6	
Fuente: (Kalpakjian y Schmid, 2002)		

Tabla 3.				
Tolerancias de contracción	aleaciones	metálicas	en moldes	de arena

 c) En la geometría final del modelo se debe considerar el ángulo de desmoldeo, para evitar el colapso de la arena de la cara de contacto del molde (González et al., 2015), como se muestra en la Figura 15.



En el caso específico de los discos de freno, la empresa Fundimetales del norte realiza el moldeo con modelos metálicos (placas de modelado), y para este caso se considera un ángulo de extracción de  $0.5^{\circ}$  (Norte, 2020).

Con base a las consideraciones expuestas en el párrafo anterior, la geometría y las dimensiones del modelo CAD del disco de freno aveo Sonic 1.6 modelo 2012 - 2014, fundido en molde de arena verde, se muestran en las Figuras 16 y 17 respectivamente.



Figura 16. Modelo CAD disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012-2014 (Modelo)



Figura 17. Dimensiones modelo de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012-2014

#### Dimensionamiento molde de fundición

Si bien, el objeto de estudio del presente trabajo de investigación se refiere a la influencia que pueden tener los diferentes tipos de arena en su llenado del molde de fundición, es muy importante realizar un correcto dimensionamiento del molde, con el objeto de replicar de manera real la geometría de éste, y poder evaluar la influencia que pueden tener los diferentes cambios de dirección y geometría en el llenado de la arena en el molde.

En muchas empresas de fundición es muy común, que el molde se elabora para la fabricación de 1 disco de freno fundido, como se muestra de manera esquemática en la Figura 18.



Figura 18. Esquema molde de fundición unitario disco de freno

Sin embargo, la evolución tecnológica, y los crecientes requerimientos de calidad y seguridad en la elaboración de autopartes, han masificado la producción de discos de freno fundidos en parejas (tándem), con alimentación lateral, para garantizar la composición química de la fundición en los dos componentes, como se muestra de manera esquemática en la Figura 19 (Fabricando, 2015), como es el caso de la empresa Fundimetales del Norte (Norte, 2020).



*Figura 19.* Esquema molde de fundición discos de freno en tándem. Fuente: (Fabricando, 2015)

Para el dimensionamiento del molde de fundición en tándem, además de las consideraciones indicadas en la sección anterior en lo referente a tolerancia dimensional, y ángulo de extracción, se toman en cuenta los siguientes parámetros de diseño del molde, de acuerdo al manual de diseño y construcción de modelos y moldes de arena (González et al., 2015):

- Ubicación de la línea de partición del molde
- Diseño de la geometría del bebedero
- Diseño de la mazarota

#### Ubicación de la línea de partición del molde

Se conoce como línea de partición al plano que separa la caja de moldeo inferior, de la caja de moldeo superior. De manera general la línea de partición debe estar ubicada en un solo plano, para evitar que el flujo del metal pueda encontrase con obstrucciones en su recorrido, y esto a su vez, produzca el desgaste del molde, el arrastre de arena, y los consiguientes efectos de inclusiones en el metal líquido y diferencias en las tolerancias dimensionales de la pieza final fundida (Joaquín Rodríguez, 2017).

En el caso específico del molde de fundición de discos de freno en tándem, la línea de partición está ubicada en el plano inferior de los nervios de ventilación, debido a la utilización de un macho o noyo, para la formación de los nervios. Para el presente caso de estudio el macho no interactúa con la arena que forma el molde de fundición, en el proceso de llenado de la arena en el molde, razón por la cual éste elemento no está considerado en el alcance de la investigación.

En la Figura 20 se muestra un esquema de la ubicación del plano correspondiente a la línea de partición para el molde de fundición, referida a la geometría del disco de freno.



Figura 20. Ubicación línea de partición molde disco de freno

# Diseño de la geometría del bebedero

El bebedero es el canal, vertical en la mayoría de las aplicaciones, por el cual se vierte el metal fundido al interior del molde. En la práctica el bebedero se compone de dos secciones, una cónica en la parte superior, y una generalmente cilíndrica en la parte inferior, que desemboca en los canales de alimentación (Joaquín Rodríguez, 2017). Ver Figura 21.



Figura 21. Esquema bebedero

Para iniciar el cálculo de las dimensiones del bebedero, es necesario realizar el análisis cinemático del fluido al interior del molde, a través del teorema de Bernouli, y de la ley de continuidad de la masa (González et al., 2015).

El teorema de Bernouli expresa que: la energía de un fluido ideal cuando se encuentra fluyendo por un conducto cerrado, se mantiene constante a lo largo de su trayectoria (Joaquín Rodríguez, 2017). La Ec. 1 muestra la relación de las variables involucradas:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{\nu 2}{2 g} = K \qquad \qquad Ec \ I$$

donde h es la altura respecto al plano de la línea de partición del molde, p es la presión a la altura h, v la velocidad del fluido a la misma altura h,  $\rho$  la densidad del fluido y g la aceleración de la gravedad.

De acuerdo a lo enunciado en el teorema de Bernouli, y a la ley de conservación de la energía, la energía en un punto 1 es igual a la energía en un punto 2, más un factor f correspondiente a las pérdidas por el rozamiento con el molde y la turbulencia del flujo (Joaquín Rodríguez, 2017) Ec. 2.

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2 g} = h_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2 g} + f$$
 Ec 2

Considerando que el sistema de moldeo se encuentra a presión atmosférica, y asumiendo las pérdidas por fricción igual a cero, la ecuación de Bernouli se expresa como la Ec. 3 (Joaquín Rodríguez, 2017).

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2 g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$
 Ec 3

En el instante que inicia el vertido del metal líquido en el molde, el fluido experimenta un movimiento en caída libre, en consecuencia, su velocidad inicial V<sub>1</sub> es igual a cero. Adicional  $h_2$  al estar ubicada en el plano correspondiente a la línea de partición del molde también tiene un valor igual a cero. Entonces despejando V<sub>2</sub> de la Ec.3, esta velocidad se expresa como la Ec. 4 (Joaquín Rodríguez, 2017).

$$V_2 = \sqrt{2gh_1} \qquad \qquad Ec \ 4$$

Como otro elemento de partida para el dimensionamiento de la caja de moldeo, se toma la información del peso de la pieza a fundir, obtenida en el software Inventor, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Propiedades físicas disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 - 2014

El parámetro de diseño de las dimensiones tanto de la caja inferior como de la caja superior, es la equivalencia de peso entre la pieza a fundir y la mas de arena de moldeo, con un factor de seguridad de 2.5 (Norte, 2020) como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.			
Pe <u>so de</u> arei	na caja de n	noldeo tándem	
Peso d	lisco de	Factor de	
fre	eno	seguridad	Peso de arena
k	g		kg
6.0	)52	2.5	15.13

Con la información del peso de arena mínimo requerido, se procede al cálculo de la altura de la caja de moldeo (tándem), y que corresponde a la altura del bebedero. Para este cálculo se toma en cuenta la sección de la caja de moldeo utilizada en la empresa Fundimetales del Norte 300 x 300 mm, y la densidad promedio de la arena de moldeo 2650 kg/m3 (Norte, 2020). Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Cálculo de altura caja de moldeo

Variable calculada	Valor	Un
Peso de arena caja de moldeo tándem	30.26	kg
Volumen de arena caja de moldeo tándem	9135.09434	cm <sup>3</sup>
Área caja de moldeo tándem	1225	$\mathrm{cm}^2$
Altura Caja de moldeo tándem	93.2	mm

El siguiente paso es calcular el tiempo de colada a través de la Ec. 5 (González et al., 2015), y con ésta información el caudal de alimentación al molde. En la Tabla 6 se muestran los valores del factor S de acuerdo a los espesores de la pieza a fundir (González et al., 2015), y en la Tabla 7 se muestran los resultados del cálculo del tiempo de colada y del caudal de alimentación al molde:

$$t = S\sqrt{M}$$
 Ec

5

Tabla 6.	
Factor S para cálculo de tiempo	de colada
Espesor de la pared mm	S
2.5 a 3.5 mm	1.68
3.5 a 8.0 mm	1.85
8.0 a 15.0 mm	2.20
Fuente: (González et	al., 2015)

54

Variable	Valor
Masa del tándem disco de freno (kg)	15.13
Factor "S" por espesor (3.5 a 8 mm)	7.20
Tiempo de colada (s)	2.10
Caudal de vaciado (kg/s)	1.88

Tabla 7.
Cálculo de tiempo de colada y caudal de alimentación

Según el estudio realizado por (Plaza, 2014), el área superior del bebedero se calcula de acuerdo a la Ec. 6:

$$A_2 = \frac{Q}{\rho_{f_{pb}}\sqrt{2gh_1}} \cdot f_{sA1} \tag{Ec 6}$$

Donde:

- "f<sub>pb</sub> (factor de pérdidas del bebedero). Se recomienda un valor de 0.5 " (Plaza, 2014)
- "f<sub>As1</sub> (factor de sobredimensionamiento del área superior del bebedero). Se recomienda aumentar el área A<sub>1</sub> para compensar las pérdidas de carga" (Plaza, 2014)

De acuerdo a la Ec. 6, en la Tabla 8 se muestran los resultados del cálculo del diámetro superior del bebedero:

Variable	Valor
Caudal de vaciado (kg/s)	2.10
Densidad específica (kg/m <sup>3</sup> )	7200
Gravedad (m/s <sup>2</sup> )	9.81
Altura del bebedero (m)	0.10
Área superior del bebedero (cm <sup>2</sup> )	5.18
Diámetro superior del bebedero (mm)	25.7

Tabla 8.Cálculo del diámetro superior del bebedero

El número de Reynolds adopta diversos valores dependiendo del tipo de flujo, laminar o turbulento que adopta el fluido, como se muestra en la Tabla 9 (González et al., 2015). Para el caso del flujo del metal líquido al interior del molde, y para la mayoría de los casos de dinámica de fluidos interesa la obtención de un flujo laminar, razón por la cual el valor seleccionado es 20000, que corresponde al límite máximo de flujo turbulento, según lo recomendado por (González et al., 2015).

Tabla 9. Valoras número de Roynolds sagún tino de fluio			
Número de Reynolds NRTipo de flujo			
< 2000	Laminar		
2000 - 4000	Transicional (Laminar a turbulento)		
4000 - 20000	Turbulento		
> 20000	Turbulento Severo		

Fuente: (González et al., 2015)

Con la Ec.4 se calcula la velocidad del fluido en la base del bebedero, y, para el cálculo de las diámetro de la base del bebedero partimos de la Ec. 7, conocida como la ecuación del número de Reynolds (González et al., 2015), que nos permite calcular la sección del canal de alimentación, y que debe ser igual a la sección inferior del bebedero, los resultados del cálculo se muestran en la Tabla 10:

$$N_{\rm R} = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu} \qquad \qquad \text{Ec 7}$$

Tabla 10. Valores número de Reynolds según tipo de flujo

Variable calculada	Valor
Velocidad en h <sub>2</sub> (m/s)	1.35
N <sub>R</sub>	20000
Densidad específica (kg/m <sup>3</sup> )	7200
Viscosidad cinemática µ (kg/m-s)	0.006935
Diámetro inferior del bebedero (mm)	14.2

Con base al valor obtenido del diámetro inferior del bebedor, se establece un área de alimentación de 1.58 cm<sup>2</sup>, lo que nos da como resultado una sección transversal del canal de alimentación de 1.25 cm de lado.

Las dimensiones del pozo de alimentación, según Plaza, (2014), se calculan de acuerdo a las relaciones indicadas en la Figura 23.



*Figura 23.* Relaciones de cálculo pozo de alimentación Fuente: (Plaza, 2014)

Las dimensiones calculadas del pozo de alimentación se muestran en la Tabla 11, y su esquema en la Figura 24:

Variable	Valor
Altura del canal de alimentación (mm)	12
Diámetro pozo de alimentación (mm)	27.3
Altura del pozo de alimentación (mm)	24

Tabla 11.Cálculo dimensiones pozo de alimentación



Figura 24. Bebedero molde de fundición disco de freno

## Diseño de la mazarota

Finalmente, el cálculo del volumen de la mazarota se realiza en base a la Ec. 8:

$$V_{MAZ} = V_{pieza} \cdot C \cdot k \qquad \qquad Ec \ 8$$

Dónde: C es el coeficiente de contracción volumétrica del metal, cuyo valore recomendado para el caso del hierro gris es del 5%, y k corresponde al factor de seguridad recomendado con un valor de 2 (Share, n.d.). Con esta información el cálculo del volumen de la mazarota se muestra en la Tabla 12:

**Tabla 12.** Cálculo del volumen de la mazarota

Variable	Valor
Volumen de la pieza (mm <sup>3</sup> )	846382.96
C	5%
k	2
Volumen de mazarota (mm <sup>3</sup> )	846.38

De acuerdo al cálculo de volumen de la mazarota, este es menor que el volumen del bebedero, como se muestra en la Figura 25, en consecuencia y según González et al., (2015) el bebedero puede cumplir la función de mazarota.

The Part			~	Update
Material				Clipboard
Iron, Gray			~	
Density		Requested Accuracy		
	7.150 g/cm^3	Low	~	
General Prop	erties			
Area	9424.532 mm <sup>2</sup>	^2 (R Y 3	15.279 mm	(Relativ
Volume Inertial Prop	erties			
Inertial Prop	ipal	Global	C	Center of Gravity
Volume Inertial Prop Princi Princi	ipal Dal Moments	Global	C	enter of Gravity
Volume Inertial Prop Princ Princip I1 506.	ipal Dal Moments 681 kg mm	Global I2 19.301 kg mm^	I3 5	Center of Gravity 06.681 kg mm
Volume Inertial Prop Princi Princi I1 506. Rotat	erties ipal Dal Moments 681 kg mm ion to Principal	Global I2 19.301 kg mm^	I3 5	Center of Gravity

Figura 25. Propiedades bebedero

## Modelo CAD molde de fundición

Con base a los resultados del dimensionamiento del sistema de alimentación del molde de fundición del disco de freno Aveo Sonic  $1.6\ 2012 - 2014$  en tándem, en la Figura 26 se muestra la geometría del molde, realizado en el software Inventor, para el proceso de moldeo en arena en verde.



Figura 26. Molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 - 2014

En las Figuras 27 y 28 se muestran la caja de moldeo inferior, y la caja de moldeo superior respectivamente.



Figura 27. Molde inferior disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 - 2014



Figura 28. Molde superior disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 - 2014

En la Figura 29 se muestra la vista lateral del molde de fundición.



*Figura 29.* Vista lateral molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014 En la Figura 30, se aprecia la distribución de las cavidades de cada molde del disco de freno.



SECTION A-A Figura 30. Sección A-A molde disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014

En la figura 31 constan las dimensiones internas de la cavidad del molde del disco de freno.

*Figura 31*. Dimensiones internas molde de fundición disco de freno Aveo Sonic 1.6 2012 – 2014

#### Caracterización de arenas de moldeo

Una vez definido el modelo CAD del molde de fundición, el siguiente paso es realizar la caracterización de las arenas de moldeo. Para ello se toma como base de estudio la base de datos de ensayos del Laboratorio de Arenas de la Empresa Química Internacional S.A. – Quintal S.A.

Química Internacional S.A. - Quintal S.A.es una empresa dedicada a la provisión de insumos y materiales para la industria siderúrgica del hierro y el acero, cuya matriz se encuentra en la ciudad de Barranquilla, y cuenta con sucursales en las ciudades de Bogotá, Medellín y Cali en Colombia, Quito en Ecuador, y, Lima en Perú. La sucursal de Bogotá cuenta con un laboratorio de caracterización de arenas de moldeo donde se realizan los siguientes análisis:

- Ensayo granulométrico.
- Análisis de PH.
- Determinación morfológica, y,
- Determinación de razón resina/catalizador por tipo de arena (Quintal, 2020).

El análisis granulométrico de las arenas de moldeo es realizado con base a la norma ASTM C136-01. Esta norma establece el método de ensayo que: "se utiliza para determinar la distribución por tamaño de las partículas de los áridos finos y gruesos mediante el uso de tamices" (ASTM C136-01, 2001).

En resumen, el método de ensayo consiste en la toma de: "una muestra de árido seco, con una masa conocida, que es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menor para determinar la distribución del tamaño de las partículas" (ASTM C136-01, 2001).

Por otra parte, en el campo de la ciencia e ingeniería de los materiales, la caracterización se conoce como el proceso de análisis de un material mediante el cual su estructura y propiedades son probadas y cuantificadas. Los aspectos más importantes de una caracterización son: la estructura, morfología y análisis químico de un material (Sharma et al., 2018).

El presente trabajo de investigación se enfoca en el estudio de la morfología de los diferentes tipos de arenas de moldeo analizados en el laboratorio de caracterización de arenas de la empresa Quintal S. A, para ser utilizados como información de entrada en el proceso de simulación CFD del llenado de la arena en el molde de fundición definido en la sección anterior, a través del índice de finura (ASTM C136-01, 2001).

De acuerdo a la información de la base de datos FQ-LE-002 correspondiente a los ensayos de granulometría de arenas de moldeo, se identifican 5 tipos de arena, cuya descripción general se detalla en la Tabla 13 (Javier Rodríguez, 2020). Por temas de confidencialidad y de protección del "Know How" de las empresas, los nombres se omiten los nombres, y las muestras se identifican con una numeración secuencial del I al V.

Descripción muestras de arena Laboratorio Quintal S.A.					
N° MUESTRA	Ι	II	III	IV	V
Peso (gr)	991	913	473	54	50
Tipo	SiO <sub>2</sub>				
Forma	Angular	Muy angular	Angular	Angular	Angular
РН	Básico	Básico	Básico	Básico	Básico
Origen	Nueva	Nueva	Recuperada	Nueva	Recuperada

Tabla 13. Descripción muestras de arena Laboratorio Quintal S.A.

El análisis granulométrico realizado en base a la norma ASTM C136-01, se efectúa en un tamizador mecánico vibratorio como el mostrado en la Figura 32, los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 14.



*Figura 32*. Tamizador mecánico. Fuente: (Proeti, 2020)

# Tabla 14.

# Análisis granulométrico según norma ASTM C136-01

						Material	Retenido				
# Tamiz	Abertura de malla	Mues	tra I	Muest	ra II	Muest	ra III	Muest	ra IV	Muest	ra V
		Peso (gr)	%	Peso (gr)	%	Peso (gr)	%	Peso (gr)	%	Peso (gr)	%
6	3.35	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%
12	1.7	0.0	0.00%	0.0	0.00%	4.0	0.85%	0.0	0.00%	0.0	0.00%
20	0.85	0.0	0.00%	0.0	0.00%	19.0	4.02%	1.0	1.85%	0.0	0.00%
30	0.6	124.0	12.51%	124.0	13.58%	84.0	17.76%	4.0	7.41%	0.0	0.00%
40	0.425	615.0	62.06%	537.0	58.82%	201.0	42.49%	3.0	5.56%	1.0	2.00%
50	0.3	213.0	21.49%	213.0	23.33%	127.0	26.85%	17.0	31.48%	1.0	2.00%
70	0.212	36.0	3.63%	36.0	3.94%	25.0	5.29%	20.0	37.04%	10.0	20.00%
100	0.15	2.0	0.20%	2.0	0.22%	9.0	1.90%	7.0	12.96%	15.0	30.00%
140	0.106	1.0	0.10%	1.0	0.11%	3.0	0.63%	2.0	3.70%	8.0	16.00%
200	0.075	0.0	0.00%	0.0	0.00%	1.0	0.21%	0.0	0.00%	6.0	12.00%
270	0.053	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	3.0	6.00%
Fondo		0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	6.0	12.00%

En la Figura 33. Se muestran las curvas de distribución del % de material retenido, en las cinco muestras analizadas.



*Figura 33*. Curvas de % material retenido Laboratorio de Caracterización de arenas Quintal S.A. Fuente: (Javier Rodríguez, 2020)

La curva de % de material retenido muestra una diferencia sustancial entre las muestras I, II, III, y, las muestras IV y V. Como se puede apreciar en la Figura 33 la curva de las tres primeras muestras es casi vertical, mientras que la curva de los dos restantes, es más horizontal, esto significa que en el primer caso la arena es de granulometría más uniforme, mientras que la granulometría en el segundo caso es más dispersa (Ordinola, 2011), lo cual será un beneficio para las arenas del primer grupo en el proceso de compactación en el molde.

Para realizar la caracterización de las arenas de moldeo, en relación al análisis granulométrico se utiliza el índice de finura IF, mismo que se obtiene al multiplicar el peso del material retenido en cada tamiz, por un factor K característico de cada tamiz, y dividir la sumatoria de estos productos entre el peso total de la muestra, como se muestra en la Ec 9 (Ordinola, 2011). El resultado del cálculo del índice de finura para cada una de las muestras se presenta en la Tabla 15.

$$IF = \frac{\sum k p_i}{P_{total}}$$
 Ec 9

Tomiz	Faatan V	K*Peso				
1 annz	Factor K	Muestra I	Muestra II	Muestra III	Muestra IV	Muestra V
6	3	0	0	0	0	0
12	5	0	0	20	0	0
20	10	0	0	190	10	0
30	20	2480	2480	1680	80	0
40	30	18450	16110	6030	90	30
50	40	8520	8520	5080	680	40
70	50	1800	1800	1250	1000	500
100	70	140	140	630	490	1050
140	100	100	100	300	200	800
200	140	0	0	140	0	840
270	200	0	0	0	0	600
Fondo	300	0	0	0	0	1800
Índice	de Finura	31.78	31.93	32.39	47.22	113.20

Tabla 15. *Cálculo índice de finura* 

El valor del índice de finura, nos indica el número de tamiz por el cual pasaría la arena, si fuese uniforme en su totalidad, y en base a este criterio según Ordinola, (2011) se asigna un número de grado, de acuerdo a la Tabla 16.

Índice de Clasificación Índice de Clasificación de grado finura de grado finura 1 200 a 300 6 40 a 50 2 140 a 200 7 30 a 40 3 100 a 140 8 20 a 30 4 70 a 100 9 15 a 20 5 50 a 70 10 10 a 15

Tabla 16. *Clasificación de grados según el índice de finura IF* 

Fuente: (Ordinola, 2011)

De acuerdo a los grados mostrados en la Tabla 16, y los resultados del cálculo del índice de finura, se establece la primera caracterización de las muestras analizadas de acuerdo a los grados que se muestran en la Tabla 17:

Caracterización según grado Grado # de Muestras	Tabla 17.					
Grado # de Muestras	Caracterización según grado					
Muestras	Grada	# de				
	Olado	Muestras				
3 1	3	1				
6 1	6	1				
7 3	7	3				

Esta caracterización también puede ser expresada de acuerdo a la AFS (Asociación Americana de Fundición por sus siglas en inglés) de la forma indicada en la Tabla 18:

Tabla 18.Clasificación AFS de acuerdo al índice de finura

Granulometría	Índice de finura	Tamaño de grano
Muy gruesa	< 15	> 1 mm
Gruesa	15 - 35	1 - 0.5 mm
Media	35 - 60	0.5 - 0.25 mm
Fina	60 - 150	0.25 - 0.10 mm
Muy fina	> 150	< 0.10 mm

Fuente: (Pallo y Valdivieso, 2018)

Con base a lo indicado en la Tabla 18, una segunda caracterización de las muestras de arena analizadas, se observa en la Tabla 19:

Muestra #	Granulometría AFS
Ι	Media
II	Media
III	Media
IV	Media
V	Fina

Adicional, de acuerdo a lo indicado en la sección 1.1.3 en la Tabla 1 (Vega, 2017), para el peso de la pieza producto de éste análisis, la arena grado 3 es la que presenta las mejores propiedades para moldeo en arena verde, dado su índice de finura, pese a que según lo expuesto anteriormente es la que presenta la curva de % de material retenido más dispersa.

Finalmente, en cuanto a la forma, la tendencia de todas las muestras es hacia una forma angular (ver Figura 34), debido a que este tipo de arena presenta un mejor comportamiento en la compactación del molde, especialmente en arenas finas, en donde los intersticios pueden ser ocupados por los granos de forma irregular (Ordinola, 2011).

Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9	ALL AND	(T)	Apte	s para		Muy es férica
0,7		0		dición	$\bigcirc$	Esférica
0,5	S		Con and	(A)	()	Semiesférica
0,3	0	0	8	0	8	Poco esférica
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

*Figura 34*. Clasificación de granos de arena de acuerdo a su forma Fuente: (Pallo y Valdivieso, 2018)

En este sentido, la simulación computacional CFD del llenado de la arena en el molde que se realiza en el siguiente apartado, permite discernir cuál de los grados es el más adecuado para esta aplicación en particular.

## Simulación CFD

Una vez realizado el modelado CAD del molde de fundición del disco de freno, así como la caracterización de los tipos de arena que constan en la base de datos de laboratorio de arenas de la empresa Quintal S.A., se procede a la simulación, mediante el software Hyperworks CFD, del flujo de la arena de moldeo al interior de la caja, y, en contacto con la placa de moldeo. Para el proceso de simulación se consideran los siguientes criterios técnicos y experimentales:

- "La mayoría de los casos de análisis de fluidos se realizan en un estado estacionario, debido a que únicamente los fluidos que se acercan a la configuración de un gas ideal pueden ser analizados bajo un régimen de estado transitorio, que se define como la variación de una o más variables de un fluido en el transcurso del tiempo" (Altair, 2019). En este sentido, y teniendo en cuenta que la variable a analizar, es decir la densidad, no tiene una variación en el tiempo, sino por efecto de la presión de apisonado, el análisis se realizará en estado estacionario, en función de la velocidad de llenado, e incluyendo la influencia de la presión de apisonado (Rosero, 2019).
- Para la simulación se toma como variable la densidad aparente de la arena de moldeo. Los valores de la densidad oscilan entre 1350 kg/m<sup>3</sup> y 1430 kg/m<sup>3</sup> (Fycomex, 2017). Con base a esta información y a los índices de finura obtenidos en el apartado anterior, los valores de la densidad aparente para el presente caso de estudio se muestran en la Figura 35 y Tabla 20.

Tabla 20



Figura 35. Densidad aparente arenas de moldeo

Densidad aparente arena	as de moldeo
Nomenclatura	Densidad Aparente kg/m <sup>3</sup>
Arena001	1350.0
Arena002	1352.1
Arena003	1354.2
Arena004	1358.4
Arena005	1362.6
Arena006	1366.8
Arena007	1375.2
Arena008	1387.8
Arena009	1404.7
Arena010	1430.00

3. El efecto de la arcilla o bentonita utilizada como elemento aglutinante para el moldeo en arena en verde sobre la densidad de la arena puede ser despreciado, debido al porcentaje mayoritario de la arena sílice frente a la arcilla: 90% de arena sílice , 7% de arcilla, y, 3% de agua (Villacís, 2015).
4. Los pesos de arena necesarios para las cajas de moldeo se obtienen a través de la herramienta "Iproperties" del software de modelado CAD inventor, para lo cual se creó el material arena de moldeo, y se ingresaron los valores de densidad respectivos, como se muestra en la Figura 36. Los valores de los pesos de arena para las diferentes densidades se muestran en la Tabla 21.



Figura 36. Herramienta "Iproperties" Inventor

Nomenclatura	Peso de arena (kg)		
i (omonouou u	Caja inferior	Caja Superior	
Arena001	29.719	31.564	
Arena002	29.765	31.613	
Arena003	29.811	31.663	
Arena004	29.904	31.761	
Arena005	29.996	31.859	
Arena006	30.088	31.957	
Arena007	30.273	31.974	
Arena008	30.551	32.448	
Arena009	30.923	32.843	
Arena010	31.480	33.435	

Tabla 21.Pesos de cajas de arena según densidad

- 5. De manera experimental se determina que el tiempo de llenado de cada caja de moldeo es de 120 segundos (Norte, 2020). Este tiempo se refiere únicamente al proceso de llenado de la arena al interior de la caja de moldeo, y no incluye las actividades de preparación, armado y desarmado de las cajas.
- 6. Con la información de los pesos de arena M necesarios para cada caja, en función de la densidad aparente de la arena, y del tiempo T de llenado determinado de manera experimental, se calcula el flujo volumétrico Q de la arena de moldeo, de acuerdo a la Ec 10, y los valores obtenidos se muestran en la Tabla 22.

$$Q = \frac{M}{T} \qquad \qquad Ec \ 10$$

Tabla 22. *Caudal volumétrico de llenado* 

Tiempo de	Caudal volumétrico (m <sup>3</sup> /s)			
Llenado (S)	Caja inferior	Caja superior		
120	0.000183	0.000195		

7. En la práctica del llenado del molde, la arena es vertida desde la parte superior en forma perpendicular a la caja de moldeo, sin embrago al aplicar la presión con el pisón la arena de distribuye de manera horizontal a través de la sección transversal de la caja de moldeo (Norte, 2020) como se muestra en la Figura 37. Bajo esta consideración para la simulación se asume el flujo de arena de manera horizontal con entrada en el lateral izquierdo, y salida en el lateral derecho.



 La sección transversal A de las cajas de moldeo tiene un valor de 35000 mm<sup>2</sup>, como se muestra en la Figura 38.



Figura 38. Sección transversal cajas de moldeo

 A partir del caudal volumétrico Q y de la sección transversal A, se calcula la velocidad de flujo V de la arena, de acuerdo a la Ec 11. Las velocidades calculadas se muestran en la Tabla 23.

$$V = \frac{Q}{A}$$

Tabla 23. Velocidades de llenado cajas de moldeo						
Sección transversal	Velocidad de llenado (m/s)					
m <sup>2</sup>	Caja inferior	Caja superior				
0.035	0.00524	0.00557				

10. De manera experimental se determina que la fuerza F que aplica el operador de moldeo a través del pisón tiene un valor de 10 kg, sobre el área A de una placa circular de 10 cm de diámetro, como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Herramienta de apisonado (Pisón diámetro 10 cm)

 Finalmente, la presión resultante P de la operación de apisonado tiene un valor de 12477.7 N/m<sup>2</sup>, y se calcula de acuerdo a la Ec 12.

$$P = \frac{F}{A} \qquad \qquad Ec \ 12$$

#### Procedimiento de simulación

Para llevar a cabo el proceso de simulación, se establece la nomenclatura mostrada en la Tabla 24 para cada una de las simulaciones:

Ec 11

omenclatura de las simulaciones		
Parte	Significado	
1° parte	M: molde	
2° parte	I: inferior	
	S: superior	
3° parte	D01 10: Densidad número 1 10	

N

Tabla 24.

El proceso de simulación se lleva a cabo de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Importar el archivo .stp del modelo CAD, teniendo en cuenta que la importación debe realizarse como un ensamble, como se muestra en la Figura 40.



Figura 40. Importación modelo CAD

2. Realizar el mallado 2D con la opción "Automesh". En esta etapa se define el tamaño y la forma de la malla. La malla seleccionada es de tamaño 4 y de forma triangular, que es la geometría recomendada para fluidos incompresibles (Altair, 2019). Adicional es importante indicar que, de acuerdo con la teoría de fluidos, únicamente los gases pueden ser considerados como fluidos compresibles, debido a que su densidad puede ser variada significativamente en función de la presión, y el resto de fluidos deben ser considerados como fluidos incompresibles (Rieutord, 2015). Complementariamente, es importante también, establecer la diferencia entre

compresibilidad y compactabilidad, así: la compresibilidad es la capacidad de los fluidos para deformarse, disminuir su volumen o incrementar su densidad en función a una presión actuante, mientras que la compactabilidad es la capacidad de un material para formar aglomerados compactos con propiedades mecánicas superiores luego de la compactación (Samayoa & Villafuerte, 2013). Con esta configuración se obtienen 92150 elementos en el mallado 2D, Figura 41.



Figura 41. Mallado 2D "Automesh"

 Una vez realizado el mallado se verifica que el mismo esté realizado correctamente, para ello se utiliza la herramienta "Mask", como se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Verificación mallado 2D "Mask"

 Crear los componentes CFD para las entradas y salidas del flujo. En el caso específico del molde de disco de freno, se crean dos componentes correspondientes a una entrada y una salida, como se muestra en la Figura 43.

Name	#		Generate	Color ^	1日
Fluid		1	Г		
Solid		1	Г		1
Multiphase		1	Г		四
Inflow		1	ম		
Outflow		1	ম		N
Wall		1	Г		
Symmetry		1	г.		
Slip		1	Г		
Far_Field		1	Г		
Free_Surface		1	Г		
Heat_Exchanger_Component		1	Г		
Fan_Component		1	Г		
Thermal_Shell		1	Г		

Figura 43. Creación de componentes

 Asignar los componentes creados a cada una de las superficies de entrada y salida definidas, mediante la herramienta "Organize", como se muestra en las Figuras 44 y 45.



Figura 44. Asignación de componentes molde inferior "Organize"



Figura 45. Asignación de componentes molde superior "Organize"

6. Realizar el mallado 3D mediante la herramienta "CFDtetramesh", en este paso se definen los componentes fijos, los componentes flotantes, así como las propiedades geométricas de la capa límite. Durante el proceso de mallado 3D es importante verificar el proceso en la esquina inferior izquierda, para verificar que no existan errores en el proceso de mallado. En el presente caso se obtuvieron 296046 elementos en el mallado 3D. Al concluir esta operación se generan dos nuevos componentes como se muestra en la Figura 46.



Figura 46. Creación de componentes "CFDtetramesh"

 Nuevamente con la herramienta "Mask" se verifica la calidad del mallado 3D, se presta especial atención a la generación de la capa límite, como se muestra en las Figuras 47 y 48 respectivamente.



Figura 47. Verificación mallado 3D "Mask"



Figura 48. Verificación capa límite

 Asignar las propiedades del fluido a la capa límite, mediante la herramienta "Organize". Una vez realizada esta operación se elimina el componente correspondiente a la capa límite, como se muestra en la Figura 49.



Figura 49. Asignación de propiedades del fluido a la capa límite

- 9. Crear los materiales correspondientes a los diferentes tipos de arena, tomando como valor variable la densidad establecida en la Tabla 20.
- 10. Configurar la descripción general del problema, los parámetros de resolución, y, las condiciones iniciales de borde.

## Información de salida simulación CFD

## Curvas de convergencia molde inferior (MI)

Entre la Figura 50 y la Figura 59 se muestran las curvas de convergencia correspondientes a las 10 simulaciones realizadas para el modelo CAD del molde Inferior, mismas que se encuentran codificadas de acuerdo a lo establecido en la Tabla 24.



Figura 50. Convergencia MID01



Figura 52. Convergencia MID03



Figura 51. Convergencia MID02



Figura 53. Convergencia MID04



Figura 54. Convergencia MID05



Figura 56. Convergencia MID07



Figura 58. Convergencia MID09



Figura 55. Convergencia MID06



Figura 57. Convergencia MID08



Figura 59. Convergencia MID10

#### Viscosidad de Eddy (VE) molde inferior (MI)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados de la viscosidad de Eddy obtenidos de la simulación del molde inferior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar que la zona de mayor viscosidad de Eddy, es decir, de mayor turbulencia, tiene similar ubicación, sin embargo, su valor varía en función de la densidad de la arena de arena de moldeo utilizada.

La Figura 60 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 60. Viscosidad de Eddy MID01

La Figura 61 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 61. Viscosidad de Eddy MID02

La Figura 62 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 62. Viscosidad de Eddy MID03

La Figura 63 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 63. Viscosidad de Eddy MID04

La Figura 64 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 64. Viscosidad de Eddy MID05

La Figura 65 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 65. Viscosidad de Eddy MID06

La Figura 66 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 66. Viscosidad de Eddy MID07

La Figura 67 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 67. Viscosidad de Eddy MID08

La Figura 68 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 68. Viscosidad de Eddy MID09

La Figura 69 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 69. Viscosidad de Eddy MID10

### Presión (P) molde inferior (MI)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados de la Presión obtenidos de la simulación del molde inferior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar que la zona de mayor presión, tiene similar ubicación, sin embargo, su valor máximo varía en función de la densidad de la arena de moldeo utilizada.

La Figura 70 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 70. Presión MID01

La Figura 71 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 71. Presión MID02

La Figura 72 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 72. Presión MID03

La Figura 73 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de



Figura 73. Presión MID04

densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.

La Figura 74 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 74. Presión MID05

La Figura 75 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 75. Presión MID06

La Figura 76 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 76. Presión CID07

La Figura 77 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 77. Presión MID08

La Figura 78 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 78. Presión MID09

La Figura 79 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 79. Presión MID10

## Coeficiente de película (CP) molde inferior (MI)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados del "Coeficiente de Película" obtenidos de la simulación del molde inferior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar una distribución similar del coeficiente de película en todos los casos, con un valor máximo en el área de ingreso del fluido, el mismo que se va disminuyendo en la trayectoria del fluido, con una ligera variación en función de la densidad de la arena de moldeo utilizada.

La Figura 80 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 80. Coeficiente de película MID01

La Figura 81 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 81. Coeficiente de película MID02

La Figura 82 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 82. Coeficiente de película MID03

La Figura 83 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 83. Coeficiente de película MID04

La Figura 84 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 84. Coeficiente de película MID05

La Figura 85 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 85. Coeficiente de película MID06

La Figura 86 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 86. Coeficiente de película MID07

La Figura 87 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 87. Coeficiente de película MID08

La Figura 88 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 88. Coeficiente de película MID09

La Figura 89 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Curvas de convergencia molde superior (MS)

Entre la Figura 90 y la Figura 99 se muestran las curvas de convergencia correspondientes

a las 10 simulaciones realizadas para el modelo CAD del molde superior, mismas que se encuentran codificadas de acuerdo a lo establecido en la Tabla 24.





Figura 92. Convergencia MSD03



Figura 94. Convergencia MSD05



Figura 96. Convergencia MSD07



Figura 93. Convergencia MSD04



Figura 95. Convergencia MSD06



Figura 97. Convergencia MSD08



#### Viscosidad de Eddy (VE) molde superior (MS)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados de la viscosidad de Eddy obtenidos de la simulación del molde superior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar que la zona de mayor viscosidad de Eddy, es decir, de mayor turbulencia, tiene similar ubicación, sin embargo, su valor varía en función de la densidad de la arena de moldeo utilizada. También se puede observar que los valores máximos presentan una variación respecto al molde inferior, debido a la geometría menos invasiva del molde superior.

La Figura 100 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350.0 kg/m<sup>3</sup>.

# ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD



Figura 100. Viscosidad de Eddy MSD01

La Figura 101 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



*Figura 101*. Viscosidad de Eddy MSD02

La Figura 102 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.2 kg/m<sup>3</sup>.



*Figura 102*. Viscosidad de Eddy MSD03

La Figura 103 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo

de densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 103. Viscosidad de Eddy MSD04

La Figura 104 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



*Figura 104*. Viscosidad de Eddy MSD05

La Figura 105 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 105. Viscosidad de Eddy MSD06

La Figura 106 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 106. Viscosidad de Eddy MSD07

La Figura 107 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 107. Viscosidad de Eddy MSD08

La Figura 108 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 108. Viscosidad de Eddy MSD09

La Figura 109 muestra la distribución de la VE para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 109. Viscosidad de Eddy MSD10
## Presión (P) molde superior (MS)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados de la Presión obtenidos de la simulación del molde superior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar que la zona de mayor presión, tiene similar ubicación, sin embargo, su valor máximo varía en función de la densidad de la arena de moldeo utilizada, al igual que en el caso del molde inferior.

La Figura 110 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 110. Presión MSD01

La Figura 111 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 111. Presión MSD02

La Figura 112 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 112. Presión MSD03

La Figura 113 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 113. Presión MSD04

La Figura 114 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de

densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 114. Presión MSD05

La Figura 115 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 115. Presión MSD06

La Figura 116 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 116. Presión MSD07

La Figura 117 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 117. Presión MSD08

La Figura 118 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 118. Presión MSD09

La Figura 119 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 119. Presión MSD10

### Coeficiente de película (CP) molde superior (MS)

En las Figuras siguientes se muestran los resultados del "Coeficiente de Película" obtenidos de la simulación del molde superior, tomando como parámetro variable la densidad de la arena de moldeo. En las figuras obtenidas mediante el módulo "Hyperview" del software "Hyperworks" de Altair, se puede observar una distribución similar del coeficiente de película en todos los casos, con un valor máximo en el área de ingreso del fluido, el mismo que se va disminuyendo en la trayectoria del fluido, con una ligera variación en función de la densidad de la arena de moldeo utilizada. Los valores máximos respecto al molde inferior, presentan un ligero incremento. La Figura 120 muestra la distribución del CP para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1350.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 120. Coeficiente de película MSD01

La Figura 121 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de

densidad 1352.1 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 121. Coeficiente de película MSD02

La Figura 122 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1354.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 122. Coeficiente de película MSD03

La Figura 123 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1358.4 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 123. Coeficiente de película MSD04

La Figura 124 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1362.6 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 124. Coeficiente de película MSD05

La Figura 125 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de



densidad 1366.8 kg/m<sup>3</sup>.

Figura 125. Coeficiente de película MSD06

La Figura 126 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1375.2 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 126. Coeficiente de película MSD07

La Figura 127 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1387.8 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 127. Coeficiente de película MSD08

La Figura 128 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1404.7 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 128. Coeficiente de película MSD09

La Figura 129 muestra la distribución de P para la simulación de una arena de moldeo de densidad 1430.0 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 129. Coeficiente de película MSD10

#### Validación

La validación del método empleado se lleva a cabo a través de la simulación CFD del proceso de solidificación de la colada de hierro gris clase 30, operación que se efectúa entre la temperatura líquidus para este material 1275 °C (1548.15 °K) que se obtiene del diagrama hierro carbón que se muestra en la Figura 129 (Pero-Sanz Elorz et al., 2018), y la temperatura de vaciado 1450 °C (1723.15 °K) (Norte, 2020), que es una característica propia de cada proceso de fundición, e incluye un valor de temperatura sobre la temperatura "líquidus", que se conoce en el ámbito metalúrgico como "superheat". Este valor del "superheat" depende de varios factores como: capacidad de la cuchara de vaciado, tipo de cuchara de vaciado, layout del área de moldeo, entre los principales, que influyen en el tiempo de vaciado del horno, y por ende en la pérdida de temperatura del metal líquido (Pero-Sanz Elorz et al., 2018).

La temperatura "líquidus" se obtiene a partir de la composición química de la aleación, específicamente del contenido de carbono, se ubica este valor en el eje de las X, y se traza una línea vertical hasta cruzar la línea de cambio de fase de austenita + líquido a la fase líquido. En el punto de cruce de estas dos líneas se traza una línea horizontal que determina la temperatura "líquidus" del metal. En la Tabla 25 se muestra la composición química del hierro gris utilizada para la producción de discos de freno (Norte, 2020).

Tab	ola 25.			
Composición química hierro gris				
	% C	% Si	% P	% S
	3.10 - 3.30	2.10 - 2.30	0.022	0.01
	Fuente: (Norte, 2020)			

Para el caso específico de la simulación el % de carbono utilizado es 3.30%, que corresponde a una temperatura "líquidus" de 1275 °C (1548.15 °K), como se muestra en la Figura 130.



*Figura 130.* Diagrama Hierro – Carbono Fuente: (Pero-Sanz Elorz et al., 2018) Modificado

Para evaluar esta influencia, existen dos alternativas: la primera a través del fenómeno de conducción que ejecutan las partículas de arena, sin embargo en la revisión bibliográfica realizada no se encontró un estudio para determinar el coeficiente de conductividad de cada tipo de arena según su índice de finura, sino que se maneja un valor global para la arena sílice, que no permite establecer una diferencia en el comportamiento, la segunda es por medio del fenómeno de convección que se da a causa de la circulación de los gases generados en el proceso de vaciado y solidificación de la colada, a través de los espacios vacíos que dejan tanto la granulometría como la morfología de los diferentes tipos de arena, y que están asociados a la propiedad de permeabilidad de la arena.

En el apartado anterior se establece que existe una disminución del coeficiente de película o coeficiente de convección de la arena conforme se incrementa el índice de finura y por ende la densidad de la arena. Tomando esta información como premisa se establece como condición de simulación un proceso de convección natural con valores del coeficiente de convección que varían entre 3 y 18 W/°K\*m<sup>2</sup> (Giles, 2009), que corresponde a un régimen de flujo laminar, y que varían de manera inversa a la densidad de la arena, es decir que a mayor densidad menor coeficiente de convección, y a menor densidad mayor coeficiente de convección.

Adicional a lo mencionado en el párrafo anterior, se utiliza el modelo CAD de un sistema de fundición de discos de freno en tándem, según se indica en la Figura 131.



Figura 131. Modelo CAD discos de freno

Luego del modelado CAD, se continua con el proceso de simulación CFD, de acuerdo al procedimiento establecido en la metodología de simulación de los moldes de fundición.

En las Figuras 132 y 133 se muestra el proceso de mallado 2D con la herramienta "Automesh".



Figura 132. Mallado 2D generación de nodos "Automesh"



Figura 133. Mallado 2D final

En el caso del modelo de los discos de freno, se utiliza un tamaño de malla 4 de tipo triangular, con lo que se obtienen 52956 elementos en el mallado 2D. Al realizar el mallado con tamaño de malla 3, el programa no se ejecuta debido a que el número de subdominios supera al número de procesadores.

En la Figura 134 se muestra el proceso de verificación de la calidad del mallado 2D a través de la herramienta "Mask".



Figura 134. Verificación mallado 2D "Mask"

En el proceso de dimensionamiento de los moldes de fundición se evidenció que para esta geometría no era necesaria la mazarota, debido a que el bebedero podía cumplir esta función. Esto fue corroborado en la práctica en la planta de la empresa Fundimetales del Norte, proceso en el cual no se utiliza la mazarota (Norte, 2020). Sin embargo, para el proceso de simulación es necesario un área de salida, para lo cual se crearon tres componentes: uno de ingreso que es asignado al bebedero, y dos de salida asignados a las mazarotas 1 y 2, como se muestra en la Figura 135.



Figura 135. Creación de componentes

En la Figura 136 se muestra la asignación de los componentes creados para el ingreso y salida del fluido, bebedero y mazarotas respectivamente.



Figura 136. Asignación de componentes "Organize"

En la Figura 137 se muestra el proceso de verificación de la calidad del mallado 3D a través de la herramienta "Mask".



Figura 137. Mallado 3D "CFD Tetramesh"

En la Figura 138, se muestra el resultado de la asignación de las propiedades del fluido a la capa límite.



Figura 138. Asignación de propiedades capa límite "Organize"

Una vez realizado el proceso de simulación, la primera actividad de validación es la generación de los perfiles de solidificación y enfriamiento, donde se evidencia que el modelo es consistente debido a que el último punto en solidificar se encuentra en el bebedero. La distribución de temperaturas en el proceso de solidificación se muestra en las siguientes Figuras:

En la Figura 139 se muestra la porción la porción del sólido que se encuentra entre los 1727 y 1706 °K (1453.85 y 1432.85 °C), y que es la última porción en solidificar.



Figura 139. Solidificación rango de temperatura 1727 – 1706 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 140 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1706 y 1685 °K (1432.85 y 1411.85 °C).



Figura 140. Solidificación rango de temperatura 1706 – 1685 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 141 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1685 y 1663 °K (1411.85 y 1389.85 °C).



Figura 141. Solidificación rango de temperatura 1685 – 1663 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 142 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1663 y 1642 °K (1389.85 y 1368.85 °C).



Figura 142. Solidificación rango de temperatura 1663 – 1642 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 143 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1642 y 1620 °K (1368.85 y 1346.85 °C).



Figura 143. Solidificación rango de temperatura 1642 – 1620 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 144 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1620 y 1599 °K (1346.85 y 1325.85 °C).



Figura 144. Solidificación rango de temperatura 1620 – 1599 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 145 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1599 y 1577 °K (1325.85 y 1303.85 °C).



Figura 145. Solidificación rango de temperatura 1599 – 1577 °K

Continuando con el proceso de solidificación, en la Figura 146 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1577 y 1556 °K (1303.85 y 1282.85 °C).



*Figura 146*. Solidificación rango de temperatura 1577 – 1556 °K

Finalmente, en la Figura 147 se muestra la porción del sólido que se encuentra entre los 1556 y 1535 °K (1282.85 y 1261.85 °C), y que es la primera porción en alcanzar el estado sólido.



Figura 147. Solidificación rango de temperatura 1556 - 1535 °K

Una segunda actividad de validación es la comparación de los diferentes modelos obtenidos al simular el proceso de solidificación de la colada, con diferentes valores de coeficiente de convección. En este caso se realizaron 10 simulaciones en las cuales se evidencia que la diferencia en el comportamiento térmico es mínima, y guarda relación con la variación del coeficiente de película evidenciado en la simulación del molde de fundición. Por esta razón se presentan únicamente los resultados de las simulaciones con coeficientes de convección, mínimo, medio y máximo dentro del rango de flujo laminar.

Un punto importante a destacar es que, debido a las secciones delgadas del modelo, la convergencia obtenida en 100 iteraciones no es suficiente, y por esta razón es necesario ejecutar la simulación en un número mayor de iteraciones, en este caso específico en 200.

En las Figuras 148, 149 y 150 se muestran las curvas de convergencia de las tres simulaciones antes citadas.



*Figura 148*. Curva de convergencia coeficiente de convección 3 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K



*Figura 149.* Curva de convergencia coeficiente de convección 9 J/m<sup>2\*</sup>s<sup>\*o</sup>K



*Figura 150*. Curva de convergencia coeficiente de convección 18 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura 151 se muestra la distribución de temperaturas en el proceso de solidificación, correspondientes al coeficiente de convección  $3 \text{ J/m}^{2*}\text{s*}^{\circ}\text{K}$ .



Figura 151. Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 3 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura 152 se muestra la distribución de temperaturas en el proceso de solidificación, correspondientes al coeficiente de convección 9 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K.



*Figura 152.* Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 9 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura 153 se muestra la distribución de temperaturas en el proceso de solidificación, correspondientes al coeficiente de convección 18  $J/m^{2*}s^{*\circ}K$ .



*Figura 153.* Distribución de temperatura simulación coeficiente de convección 18 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura, 154 se muestran los resultados de la simulación, en un corte a la altura de los nervios de ventilación del disco de freno, con el coeficiente de convección  $3 \text{ J/m}^{2*}\text{s*}^{\circ}\text{K}$ .



*Figura 154*. Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 3 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura, 155 se muestran los resultados de la simulación, en un corte a la altura de los nervios de ventilación del disco de freno, con el coeficiente de convección 9 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K.



*Figura 155.* Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 9 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

En la Figura, 156 se muestran los resultados de la simulación, en un corte a la altura de los nervios de ventilación del disco de freno, con el coeficiente de convección 18 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K.



*Figura 156.* Corte sección nervios de ventilación coeficiente de convección 18 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

Las gráficas correspondientes a las demás simulaciones realizadas se encuentran en el

Anexo 2.

#### **Resultados**

#### Viscosidad de Eddy molde inferior

La simulación nos da la curva de relación entre la densidad y la viscosidad de Eddy, se observa que a medida que se incrementa la densidad de la arena de moldeo la viscosidad de Eddy disminuye, y el flujo incrementa su carácter laminar. Esto favorece la adaptación de la arena a las diferentes formas del modelo. El resultado se muestra en la Tabla 26 y Figura 157.

ılta <u>dos Viscosidad de Eddy molde i</u> r		
Densidad	Viscosidad de Eddy	
kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s	
1350.0	0.1150	
1352.1	0.1558	
1354.2	0.1437	
1358.4	0.1260	
1362.6	0.1406	
1366.8	0.1524	
1375.2	0.1489	
1387.8	0.1150	
1404.7	0.1150	
1430.0	0.1443	

Tabla 26. Resultados Viscosidad de Eddy molde inferior Viscosidad de



Figura 157. Regresión simple Viscosidad de Eddy vs. Densidad molde inferior

# Viscosidad de Eddy molde superior

Para el caso del molde superior, la curva de regresión simple entre la densidad y la viscosidad de Eddy, evidencia de igual manera que a medida que se incrementa la densidad de la arena de moldeo la viscosidad de Eddy disminuye, y el flujo incrementa su carácter laminar. La pendiente es menor debido a que la geometría del molde superior que es menos invasiva. El resultado se muestra en la Tabla 27 y Figura 158.

ultad <u>os Viscosidad de Eddy molde sup</u> eri			
Densidad	Viscosidad de		
Delisidad	Eddy		
kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /s		
1350.0	0.1546		
1352.1	0.1546		
1354.2	0.1546		
1358.4	0.1546		
1362.6	0.1682		
1366.8	0.1427		
1375.2	0.1555		
1387.8	0.1348		
1404.7	0.1597		
1430.0	0.1551		

Tabla 27. Resultados Viscosidad de Eddy molde superior Viscosidad do



Figura 158. Regresión simple Viscosidad de Eddy vs. Densidad molde superior

## Presión molde inferior

La curva de regresión simple de la presión en el molde inferior en función de la densidad, muestra que la presión se incrementa a medida que la densidad de la arena de moldeo es mayor, esto significa que a medida que la densidad de la arena de moldeo aumenta se mejora la compactabilidad en el moldeo. Este resultado se muestra en la Tabla 28 y Figura 159.

Resultados Presión molde inferior			
Densidad	Presión		
kg/m <sup>3</sup>	$x10^3 \text{ N/m}^2$		
1350.0	2541		
1352.1	2544		
1354.2	2550		
1358.4	2569		
1362.6	2563		
1366.8	2575		
1375.2	2592		
1387.8	2632		
1404.7	2632		
1430.0	2691		

Tabla 28.Resultados Presión molde inferior



Figura 159. Regresión simple Presión vs. Densidad molde inferior

# Presión molde superior

La curva de regresión simple de la presión en el molde superior en función de la densidad, muestra que la presión se incrementa a medida que la densidad de la arena de moldeo es mayor, esto significa que a medida que la densidad de la arena de moldeo aumenta se mejora la compactabilidad en el moldeo. Este resultado se muestra en la Tabla 29 y Figura 160.

Tabla 29.	
Resultados Pre.	sión molde superior
Densidad	Presión
kg/m <sup>3</sup>	$x10^{3} \text{ N/m}^{2}$
1350.0	2536
1352.1	2536
1354.2	2536
1358.4	2536
1362.6	2546
1366.8	2545
1375.2	2577
1387.8	2593
1404.7	2629
1430.0	2676



Figura 160. Regresión simple Presión vs. Densidad molde superior

## Coeficiente de película molde inferior

La curva de regresión simple del coeficiente de película en el molde inferior, muestra una ligera tendencia creciente en función de la densidad de la arena de moldeo. Sin embargo, la influencia de esta variable no mostró incidencia en el comportamiento térmico del metal líquido al interior del molde, por lo que su efecto podría ser desestimado. El resultado se muestra en la Tabla 30 y Figura 161.

J	5
Densidad	Coeficiente de
kg/m <sup>3</sup>	Película
1350.0	161.9
1352.1	161.3
1354.2	182.7
1358.4	207.6
1362.6	210.8
1366.8	197.6
1375.2	164.6
1387.8	204.5
1404.7	201.4
1430.0	169.7

Tabla 30. *Resultados Coeficiente de Película molde inferior* 



Figura 161. Regresión simple Coeficiente de película vs. Densidad molde inferior

## Coeficiente de película molde superior

Tabla 31.

La curva de regresión simple del coeficiente de película en el molde superior, muestra una tendencia creciente en función de la densidad de la arena de moldeo, con una mayor pendiente, sin embargo, sus valores son menores que en el molde inferior. De igual manera, la influencia de esta variable no mostró incidencia en el comportamiento térmico del metal líquido al interior del molde, por lo que su efecto podría ser desestimado. El resultado se muestra en la Tabla 31 y Figura 162.

ltad <u>os Coeficiente de Película molde</u> supe			
	Densidad	Coeficiente de	
	kg/m <sup>3</sup>	Película	
	1350.0	159.7	
	1352.1	159.7	
	1354.2	159.7	
	1358.4	159.7	
	1362.6	161.5	
	1366.8	163.6	
	1375.2	160.4	
	1387.8	176.8	
	1404.7	168.3	
	1430.0	167.6	

Resultado erior

D 1/



Figura 162. Regresión simple Coeficiente de película vs. Densidad molde superior

#### Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación CFD del flujo de la arena de moldeo en los moldes inferior y superior, tomando como elemento de entrada la información proveniente de los ensayos del laboratorio de arenas de la empresa Quintal, y, que, posteriormente han sido validados con la simulación CFD del flujo del metal líquido al interior del molde, muestran que la granulometría de la arena tiene una influencia directa en la Viscosidad de Eddy y en la presión al interior del molde, y en el caso de la presión específicamente en la capa de arena que está en contacto con el metal líquido, que se la conoce como arena de contacto. Esta influencia se valida numéricamente a través de los valores de los coeficientes de correlación obtenidos en el modelo ajustado las curvas de regresión simple, que nos indican:

- Si la relación entre las variables tiene una asociación positiva o negativa.
- Que tan fuerte es la asociación dependiendo si los valores se acercan a 1 o -1.

Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos se muestran en la Tabla 32.

D. 1. 14	Coeficiente de correlación		
Relacion	Molde inferior	Molde superior	
Viscosidad de Eddy - Densidad	-0.1433	-0.073	
Presión - Densidad	0.9849	0.9913	
Coeficiente de película - Densidad	0.0566	0.6675	

#### Tabla 32 Coeficientes de correlación

De acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 32, se establece que la presión es la variable que tiene una asociación positiva fuerte con la densidad de la arena de moldeo, ya que los valores de los coeficientes de correlación son cercanos a 1.
De igual manera se puede observar que la viscosidad de Eddy guarda una asociación negativa débil con la densidad de la arena de moldeo, ya que sus valores son cercanos a cero, especialmente en el molde superior.

En el caso del coeficiente de película se presenta un fenómeno interesante, ya que la asociación positiva en el caso del molde inferior es débil, es decir el valor del coeficiente de correlación es cercano a cero, mientras que en el caso del molde superior la asociación positiva es fuerte, debido a que el valor del coeficiente de correlación se acerca a 1. Esto de acuerdo a lo investigado en el estado del arte (Mais et al., 2014) se debe a que la geometría menos invasiva del molde superior permite una mayor fluidez de la arena.

A su vez la disminución del valor de la viscosidad de Eddy, de acuerdo a lo expresado en el estado del arte (Rieutord, 2015), favorece el carácter laminar del fluido, mejorando de esta manera la adaptabilidad de la arena a la geometría del modelo del disco de freno. De esta manera al disminuir el régimen turbulento del fluido, se reduce la posibilidad de generar espacios vacíos que pueden ocasionar defectos superficiales en los discos de freno fundidos.

Adicional cabe indicar que los resultados de la viscosidad de Eddy obtenidos tanto en el molde superior como en el molde inferior, garantizan el carácter laminar del fluido. Esto se corrobora al calcular el número de Reynolds con la Ec 7, en donde se obtiene que los valores fluctúan entre 189.97 a 225.03 en el caso del molde inferior, y 167.39 a 176.74 en el caso del molde superior, con lo cual se comprueba que el flujo es laminar.

Otro punto a destacar en el análisis de los valores de viscosidad de Eddy obtenidos es la diferencia en el valor de la pendiente de la curva de regresión simple, entre el molde inferior y el molde superior. La relación entre las pendientes de las curvas de regresión es de 3.55:1, esto nos indica que la variación de la viscosidad de Eddy, está en estrecha relación con la geometría del recipiente que contiene el fluido, de tal manera que mientras mayor

interferencia tenga el fluido, mayor va a ser la variación en el valor de la viscosidad de Eddy, y por ende mayor será el carácter turbulento del mismo. La relación entre las pendientes se puede observar en la Figura 163.



Figura 163. Relación entre pendientes viscosidad de Eddy

Adicional estos resultados concuerdan con el modelo de viscosidad de Eddy que se obtiene a partir de las ecuaciones de Navier Stokes, que expresa que mientras mayor es el valor de viscosidad de Eddy, o el flujo es más viscoso, se incrementan los esfuerzos cortantes en la cercanía de la superficie de contacto del fluido con las paredes del recipiente, y el fluido adquiere mayores perfiles de velocidad, que lo hacen más turbulento (Rieutord, 2015), como se muestra en la Figura 164.



*Figura 164.* Diferencia de perfiles de velocidad entre flujos viscosos (reales) y no viscosos(ideales). Fuente (Rieutord, 2015) Modificado

Un factor adicional que permite identificar la influencia de la geometría en el tipo de flujo, sea éste laminar o turbulento, es la diferencia en el número de iteraciones necesarias para lograr la convergencia de las simulaciones. Es así que en el caso de los moldes tanto inferior como superior se requirieron 100 pasos de simulación, mientras que, en el caso de la simulación del tándem de discos de freno, fue necesario incrementar los pasos de simulación a 200 para lograr la convergencia de los resultados. Esto corrobora lo expresado en el estado del arte (Altair, 2019).

En cuanto al comportamiento térmico del metal líquido al interior del molde, los autores (Pallo y Valdivieso, 2018) citados en el desarrollo del estado del arte concluyen que la variación en ciertas propiedades de las arenas de moldeo, no tienen influencia significativa en el proceso de solidificación, ya que por ejemplo la variación de temperatura entre los diferentes modelos de simulación es menor a 1 °C, y la estratificación de temperaturas permanece constante todos los rangos de temperatura analizados del proceso de solidificación de la colada.

En lo referente a los resultados de la variable presión obtenidos, el proceso de simulación indica que, en ambos casos, molde inferior y molde superior, la presión incrementa de manera directa con el incremento de la densidad, es decir que a mayor densidad de la arena de moldeo se tiene una mayor presión de compactación, con una pendiente de la curva de 1.8311 y 1.837 respectivamente, lo que incidirá en el acabado superficial de las piezas finales fundidas.

Al analizar las pendientes de las curvas de regresión para el caso de la variable presión se determina que no existe una variación entre el valor de la pendiente del molde superior con respecto al molde inferior, lo que nos indica que, para el caso de la presión, en esta simulación en específico la granulometría de la arena no es un elemento diferenciador en la tendencia de incremento de la presión. La diferencia se da únicamente en el valor absoluto de la presión por efecto de la geometría diferente de los moldes.

### Conclusiones

- Como resultado del presente trabajo de investigación se concluye que el índice de finura evaluado a través de la densidad de las arenas en un proceso de moldeo en verde, tienen incidencia directa en la calidad superficial de la pieza fundida, principalmente por efecto de la presión que guarda una asociación positiva fuerte de entre 0.9849 y 0.9913 con respecto a la variación de la densidad, lo cual puede ser evaluado a través de la rugosidad superficial. No así en el comportamiento térmico del metal líquido en el proceso de solidificación, donde se pudo evidenciar que la variación es menor a 1°C de temperatura en las fases de solidificación.
- El proceso de simulación es muy sensible a la variación de las condiciones de borde, por lo que se concluye que es de vital importancia la definición correcta de las variables de simulación, sean estas, materiales, temperaturas, velocidades entre las principales. Esto se pudo verificar en las curvas de convergencia, las cuales en el caso de las simulaciones con condiciones de borde errados superaron el valor de 0.001 establecido como parámetro de convergencia.
- El estudio permite concluir también que la geometría del molde es una variable que debe ser tomada en cuenta, para que el análisis de los resultados aporte con criterios técnicos fiables.
- El proceso de simulación desarrollado con el software Hyperworks de Altair, permite concluir que el software es una herramienta con mucho potencial, esto se demuestra en el hecho de que, pese a no ser un software especializado en fundición, posee herramientas muy versátiles que permiten realizar análisis como el del ciclo de solidificación presentado en el apartado de validación, lo cual es de gran utilidad para el rediseño especialmente de los sistemas de alimentación como bebederos, compuertas y mazarotas.

### Recomendaciones

- Se recomienda realizar un proceso de simulación similar al objeto del presente estudio, para el caso del macho utilizado en la formación de los nervios de ventilación del disco de freno. En este elemento se tienen formas más complejas y de menor sección, que pueden corroborar la influencia del flujo laminar en la adaptación de la arena a formas de mayor complejidad. En este elemento se manejan espesores menores a 6 mm y sería de mucho aporte verificar el comportamiento de la arena en estos casos.
- En el desarrollo del método de validación, se pudo evidenciar que no existe información referente a la variación de la conductividad térmica en función de la densidad de la arena de moldeo, tan solo existe un valor genérico (1.4 W/m °K) que no permite evaluar los diferentes tipos de arena, en este sentido se recomienda encaminar un trabajo de investigación que permita determinar la relación entre la densidad y la conductividad térmica de la arena sílice. Con esta información será posible complementar el presente estudio con el análisis térmico en conjunto desde el punto de vista de convección y conductividad térmica.
- Finalmente se recomienda una vez superadas las limitaciones actuales, desarrollar un trabajo práctico experimental, que permita avalar los resultados obtenidos mediante la simulación CFD realizad en el presente trabajo de investigación.

#### Referencias

- Ajibola, O. O., Oloruntoba, D. T., & Adewuyi, B. O. (2015). Effects of Moulding Sand Permeability and Pouring Temperatures on Properties of Cast 6061 Aluminium Alloy. *International Journal of Metals*, 2015, 1–13. https://doi.org/10.1155/2015/632021
- Altair. (2019). *Altair AcuSolve Training Manual* (p. 224). Altair engineering Inc. http://wpc.23a7.iotacdn.net/8023A7/origin2/secure/downloads/hw2019/documentation/A cuSolve\_2019\_Training\_Manual.pdf?8eeea393ef108aed610d98fd45dc22e8d47a3e8a59b a5c83a4bd52df57f3cd0c8003efe03dff4be33b3633114a5b232666967a9c3abc10d11df233 6af08612a92acb212a0a49
- Arroyo, P. (2012). Diseño de una Máquina rectificadora de discos de freno estándar para vehículos automotores livianos. Universidad Internacional SEK.
- ASTM C136-01. (2001). ASTM C 136- 01 Método de ensayo normalizado para determinar el análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos. *ASTM International*.
- Bazante, P. (2019). Diseño de un molde permanente de fundición por gravedad para la fabricación de pesas adhesivas de plomo utilizadas en el balanceo de neumáticos.
  Universidad Internacional SEK.
- Belhocine, A., & Afzal, A. (2019). FEA Analysis of coupled thermo-mechanical response of grey cast iron material used in brake discs. *Revista Científica*, 3(36), 280–296. https://doi.org/10.14483/23448350.14827
- Bisbal, R., Gómez, F., Di Yorio, C., & Pérez, M. (2015). Evaluación de las características y propiedades de fundición de Arena de Olivino Venezolana (Parte I). *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, *30*(3), 95–110.

Büchner, H. (2016). Global Economy and the Situation of the Foundry Industry.

Campbell, J. (2015). Sixty Years of Casting Research. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 46(11), 4848–4853. https://doi.org/10.1007/s11661-015-2955-8

Carrión, V. (2020). Base de datos clientes Quintalec\_Marzo 2020.

- Díaz, S. (2012). *Propuesta de una mezcla alternativa para la arena verde de JCR fundiciones*. Universidad San Francisco de Quito.
- Disagroup. (2014). Producción de discos de freno ¿es posible la optimización? DISA. https://www.disagroup.com/es-us/whats-new/technology-insights/brake-disc-production
- Dobosz, S. M., Grabarczyk, A., & Major-Gabrys, K. (2017). Elasticity of Moulding Sands- A Method of Reducing Core Cracking. Archives of Foundry Engineering, 17(1), 31–36. https://doi.org/10.1515/afe-2017-0006
- Escuela Politécnica Nacional. (2020). *Laboratorio de Fundición*. https://www.epn.edu.ec/laboratorio-de-fundicion/
- Esteban, C. Á., Hernández, G., Ignacio, M., Pérez, R., & Carlos, S. J. (2012). Metodología de trabajo para el diseño de discos de freno. 1. *Congreso Internacional SOMIM*, 368–377.
- Fabricando. (2015). *Fabricando Made In Spain LE FC*. https://www.youtube.com/watch?v=NCFrX0sczhI
- Fycomex. (2017). *Moldeo*. Fycomex. https://docplayer.es/14114000-Iii-moldeo-fundicion-enarena.html
- Garcés, M. (2016). Diseño, construcción y simulación del llenado de un molde en arena en verde para fundición de piezas de aluminio blanco. Escuela Politécnica Nacional.

García-León, R. A., Echavez Díaz, R. D., & Flórez Solano, E. (2018). Análisis termodinámico

de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *Inge Cuc*, *14*(2), 9–18. https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.01

- García, J. (2013). Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena [Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla]. http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60372/fichero/PFC+Jose+2+La+fundición+en+are na.pdf
- Giles, R. V. (2009). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Teoría y 75 problemas resueltos* (McGraw Hill (ed.); Vol. 62, Issue 4). https://doi.org/10.1111/j.1752-1734.2009.01342.x
- González, L., Ramírez, J., & Villalta, A. (2015). Elaboración e implementación de manuales de diseño y construcción de modelos y moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio. Universidad de El Salvador.
- Guamán, D., & Oña, A. (2016). Análisis del estado de producción de piezas metálicas fundidas mediante muestreo en las ciudades de Quito y Guayaquil al 2015. Escuela Politécnica Nacional.
- Hu, Q., Zhao, H., Long, H., Dong, P., & Zhu, G. (2020). Numerical simulation of mold filling and particulate flow of A356/SiCp indirect squeeze casting. *Journal of Composite Materials*, 54(12), 1593–1602. https://doi.org/10.1177/0021998316644855
- Huaca, E. (2011). Simulación mediante el programa "Vulcan" de la fundición de tres geometrías diferentes en aluminio. Escuela Politécnica Nacional.
- Imbaquingo, J., & Andino, R. (2019). *Directorio de industrias y establecimientos 2018*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/directoriodeempresas/

- Iqbal, H., Sheikh, A. K., & Younas, M. (2012). Mold design optimization for sand casting of complex geometries using advance simulation tools. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7), 775–785. https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648250
- Jami, M. (2019). Diseño y construcción de un molde permanente para la fabricación de bornes de baterías automotrices. Universidad internacional SEK.
- Jiménez, C., & Medina, J. (2012). Análisis y diseño de un disco de frenos de una unidad minibaja. Instituto Politécnico Nacional - México.
- Jiménez, R. (2011). Influencia de los elementos grafitizantes sobre las propiedades mecánicas y térmicas de un disco de freno automotriz de hierro gris hipereutéctico [Instituto Politécnico Nacional].

https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/14108/1/SEPI ESIME UA.pdf

- Kaleicheva, J. A., & Mishev, V. P. (2018). Effect of nanoadditives on the structure and properties of austempered ductile irons. *Materials Science Forum*, 919, 34–42. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.919.34
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Pearson (ed.); Quinta). Prentice Hall. http://books.google.com/books?id=gilYI9\_KKAoC&pgis=1
- Kundu, R. R., & Lahiri, B. N. (2008). Study and statistical modelling of Green Sand Mould properties using RSM. *International Journal of Materials and Product Technology*, *31*(2–4), 143–158. https://doi.org/10.1504/IJMPT.2008.018016
- Lampman, S. (2009). Casting Design and Performance. In *Casting Design and Performance* (First). ASM International.

López, J. (2011). Fundamentos de conformación por fusión de metales (U. P. de Cartagena

(ed.); Primera). Universidad Politécnica de Cartagena.

- Lorenzo, S. S. (2018). Propuesta De Diseño Para Disco De Freno Ventilado. Universidad de Valadolid.
- Mais, V., Guesser, W. L., & Masiero, I. (2014). Estudo da fluxibilidade em areias de moldagem
  a verde. *Revista Materia*, 19(2), 94–104. https://doi.org/10.1590/S151770762014000200004
- Malinowski, P., Suchy, J. S., & Jakubski, J. (2013). Technological knowledge management system for foundry industry. Archives of Metallurgy and Materials, 58(3), 965–968. https://doi.org/10.2478/amm-2013-0111
- Norte, F. del. (2020). Fundimetales del Norte. http://fundimetalesdelnorte.com/
- Ordinola, J. (2011). *Caracterización de las tierras de moldeo de El Porvenir de la Provincia de Sullana*. Universidad de Piura.
- Pallo, E., & Valdivieso, A. (2018). Estudio de las propiedades de las arenas y su influencia en las piezas fundidas en ciertos talleres de fundición de la ciudad de Quito. Escuela Politécnica Nacional.
- Pandia, Y., Suchy, J., & S Nagaraj. (2018). Adaptative product manufacturing technique for foundry industry using IoT technology: An industry 4.0 initiative. 73rd World Foundry Congress.
- Pero-Sanz Elorz, J. A., Fernández González, D., & Verdeja, L. F. (2018). Physical Metallurgy of Cast Irons. In *Physical Metallurgy of Cast Irons*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97313-5

Plaza, F. (2014). Diseño de los sistemas de distribución en procesos de fundición por gravedad

*mediante un método analítico* [Universidad Poltécnica de Cartagena]. https://repositorio.upct.es/handle/10317/4345#.XpGEk4NQSU4.mendeley

- Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Lysenko, T., Solonenko, L., & Shynsky, V. (2020). A New Technology for Producing the Polystyrene Foam Molds Including Implants at Foundry Industry. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine* (Vol. 2). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6
- Proeti. (2020). *Producción de equipos técnicos e industriales S.A.* http://proetisa.com/proetisabuscar.php
- Quintal. (2020). Química Internacional S.A. http://quintal.com.co/servicios/
- Revelo, F. (2011). Selección de la mezcla de moldeo óptima para fundición de aluminio con el uso de modelos gasificables. Escuela Politécnica Nacional.
- Rieutord, M. (2015). Fluid dynamics An Introduction. In W. Rhodes, R. Needs, S. Scott, E. Stanley, & M. Stutzmann (Eds.), *Aerospace America* (First, Vol. 44, Issue 12). Springer.
- Rodríguez, Javier. (2020). FQ-LE-002 Base de datos ensayos laboratorio de arenas Quintal (p. 5).
- Rodríguez, Joaquín. (2017). Fundamentos de Procesos Convencionales de Fabricación Mecánica (Ediciones@upct.es (ed.); Primera). rai ediciones. https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6068/isbn9788416325559.pdf?sequen ce=1&isAllowed=y

Rosero, J. (2019). Simulación Térmica En Estado Transitorio Del Flujo De Gas En Líneas De

Flujo "Riser" En Pozos Representativos Del Campo Amistad. Escuela Politécnica Nacional.

- S. Manavalan, Aswin Gopi, J. Arivarasu, A. A. A. and S. C. (2019). Review on Ceramic Disc Brake System. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 23(3), 535– 543. https://doi.org/10.37200/IJPR/V23I3/PR190152
- Said, R. M., Kamal, M. R. M., N. H. Miswan, & Ng, S. J. (2018). Optimization of Moulding Composition for Quality Improvement of Sand Casting. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12, 301–310.
- Saikaew, C., & Wiengwiset, S. (2012). Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings. *Applied Clay Science*, 67–68, 26–31. https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.07.005
- Salueña, X., & Nápoles, A. (2000). *Tecnología Mecánica* (E. UPC (ed.); Primera). Edicions UPC.
- Sama, S. R., Badamo, T., & Manogharan, G. (2020). Case Studies on Integrating 3D Sand-Printing Technology into the Production Portfolio of a Sand-Casting Foundry. *International Journal of Metalcasting*, 14(1), 12–24. https://doi.org/10.1007/s40962-019-00340-1
- Samayoa, L., & Villafuerte, L. (2013). Compactabilidad como un parámetro de funcionalidad del excipiente GalenIQ 720. Scielo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1870-01952013000300005#:~:text=La compresibilidad es la capacidad,fuertes después de su compresión.

Samuel Gómez. (2017). Mallado y simulación CFD de automóvil. Escuela Técnica Superior de

Ingeniería.

- Share, S. (n.d.). *Moldeo de piezas metálicas*. Retrieved June 23, 2020, from https://es.slideshare.net/ArnulfoPerez2/calculo-mazarota
- Sharma, S. K., Verma, D. S., Khan, L. U., Kumar, S., & Khan, S. B. (2018). Handbook of Materials Characterization. In *Handbook of Materials Characterization*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2
- Teskeredžić, A., Demirdžić, I., & Muzaferija, S. (2015). Numerical method for calculation of complete casting processes - Part I: Theory. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 68(4), 295–316. https://doi.org/10.1080/10407790.2015.1033296
- Thiel, J., Ravi, S., & Bryant, N. (2017). Advancements in materials for three-dimensional printing of molds and cores. *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 3–13. https://doi.org/10.1007/s40962-016-0082-y
- Upadhyay, M., Sivarupan, T., & El Mansori, M. (2017). 3D printing for rapid sand casting—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211–220. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.017
- Vasková, I., Varga, L., Prass, I., Dargai, V., Conev, M., Hrubovčáková, M., Bartošová, M., Buľko, B., & Demeter, P. (2020). Examination of behavior from selected foundry sands with alkali silicate-based inorganic binders. *Metals*, 10(2), 1–16. https://doi.org/10.3390/met10020235
- Vega, Y. (2017). *Moldeo en arena verde*. https://www.slideshare.net/yezeta/moldeo-en-arenaverde
- Villacís, E. (2015). Análisis de la conducta de mezclas de moldeo para fundición aglomeradas

con resinas autofraguantes fenólico uretanas. Escuela Politécnica Nacional.

- Wang, Z., He, X., & Ma, Y. (2012). Research on automotive castings foundry production of energy conservation technology. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, EMEIT 2012*, 1435–1438. https://doi.org/10.2991/emeit.2012.318
- Zhang, Y., Zhao, X., Yang, K., Xue, K., Yao, P., & Yao, S. (2019). Research of reverse engineering on dimensional accuracy of parts in digital casting process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 563(2). https://doi.org/10.1088/1757-899X/563/2/022051
- Zheng, J., Chen, A., Zheng, W., Zhou, X., Bai, B., Wu, J., Ling, W., Ma, H., & Wang, W. (2020). Effectiveness analysis of resources consumption, environmental impact and production efficiency in traditional manufacturing using new technologies: Case from sand casting. *Energy Conversion and Management*, 209(March), 112671. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112671

🔦 auintal	Ana	isis de Granulome	tria por tamizado		Norma ASTM C136-01
Empresa :			Fecha :	18/3/2020	
Producto a analizar :	Arena muestra 1		Peso de la muestra :	4	9 gramos
Apertura de la Malla	No de tamiz	Peso Retenido	% de arena retenida	Coeficiente	% retenido X Coeficiente
3.350	9			e	0
1.700	12			2	0
0.850	20	2	4.1%	10	0.4
0.600	30	3	6.1%	20	1.2
0.425	40	6	18.4%	30	5.5
0.300	50	14	28.6%	40	11.4
0.212	70	12	24.5%	50	12.2
0.150	100	9	12.2%	70	8.6
0.106	140	2	4.1%	100	4.1
0.075	200	1	2.0%	140	2.9
0.053	270			200	0
				270	0.00
	Total		49 100	%	
Indie	ce de Finura		39		
Obervaciones :	Entre la Malla 50 y 70 se e	encuentra el 53.1%			
elaboro :	Javier	Rodriguez			

# Anexos

ESTUDIO INFLUENCIA TIPO DE ARENA, SIMULACIÓN CFD

Anexo 1 Registros tipo de ensayos laboratorio de arenas empresa Quintal S.A.

QUINTAL.

Quintal	Analis	is de Granulometri	a por tamizado		Norma ASTM C136-01	the second second second second
Empresa :			Fecha :	25/10/2019		
Producto a analizar :	Arena recuperada muestra 2		Peso de la muestra :	17	7 gramos	
Apertura de la Malla	No de tamiz	Peso Retenido	% de arena retenida	Coeficiente	% retenido X Coeficiente	-
3.350	9			3	0	1
1.700	12			S	0	1
0.850	20	2	3%	10	0.3	T
0.600	30	я	4%	20	1	The state of the s
0.425	40	5	6%	30	2	The rest of the local division in which the local division in the
0.300	50	14	18%	40	7	The statement
0.212	70	28	36%	50	18	The rest of the local division in the local
0.150	100	17	22%	70	15	1
0.106	140	9	8%	100	8	The statement of the local division of the l
0.075	200	2	3%	140	4	The statement of the st
0.053	270			200	0	The state of the s
				270	0.00	The supervised in the local division of the
	Total	77	100	%		
Indi	ce de Finura	55.3				

Entre la Malla 50 y 100 se encuentra el 69%

Obervaciones :

Elaboro:

QUINTAL.

<b>S</b> ouintal	Analis	is de Granulomet	ria por tamizado		Norma ASTM C136-01	
Empresa : Producto a analizar :	Arena muestra 1	_	Fecha : Peso de la muestra :	25/10/2019 54	gramos	1
Apertura de la Malla	No de tamiz	Peso Retenido	% de arena retenida	Coeficiente	% retenido X Coeficiente	Г
3.350	6			3	0	T
1.700	12			5	0	Γ
0.850	20	1	1.9%	10	0.2	Γ
0.600	30	4	7.4%	20	1	
0.425	40	3	5.6%	30	2	
0.300	50	17	31.5%	40	13	
0.212	70	20	37.0%	50	19	Ι
0.150	100	7	13.0%	70	6	
0.106	140	2	3.7%	100	4	
0.075	200			140	0	
0.053	270			200	0	Г
				270	0.00	
	Total		54 100	%		1
Indi	ce de Finura	7				

Entre la Malla 50 y 70 se encuentra el 68.5%

Obervaciones :

Elaboro :

QUINTAL.

Quintal	Anali	sis de Granulomet	ria por tamizado		Norma ASTM C136-01	
:mpresa : oroducto a analizar :	Arena recuperada muestra	2	Fecha : Peso de la muestra :	12/9/2019 473	gramos	1
Apertura de la Malla	No de tamiz	Peso Retenido	% de arena retenida	Coeficiente	% retenido X Coeficiente	Г
3.350	6			3	0	Т
1.700	12	4	1%	5	0	T
0.850	20	19	4%	10	0	T
0.600	30	84	18%	20	4	Т
0.425	40	201	42%	30	13	Т
0.300	50	127	27%	40	11	Т
0.212	70	25	5%	50	3	T
0.150	100	6	2%	70	1	T
0.106	140	3	1%	100	1	T
0.075	200	1		140	0	T
0.053	270			200	0	T
				270	0.00	T

Obervaciones : Entre la Malla 40 y 50 se encuentra el 69%

Indice de Finura

Total

100%

173

32

Elaboro :

QUINTAL.

🔗 Quintal	Anal	isis de Granulometri	ia por tamizado		Norma ASTM C136-01	
Empresa : Producto a analizar :	Arena muestra 1		Fecha : Peso de la muestra :	12/9/2019 913	) gramos	1
Apertura de la Malla	No de tamiz	Peso Retenido	% de arena retenida	Coeficiente	% retenido X Coeficiente	
3.350	9			m	0	
1.700	12			5	0	
0.850	20			10	0	
0.600	30	124	14%	20	£	
0.425	40	537	59%	30	18	
0.300	50	213	23%	40	6	
0.212	70	36	4%	50	2	
0.150	100	2	%0	70	0	-
0.106	140	1	%0	100	0	
0.075	200			140	0	
0.053	270			200	0	
				270	0.00	
	Total	913	100	%		1
Indie	ce de Finura	32				

Obervaciones : Entre la Malla 40 y 50 se encuentra el 82%

Elaboro :

QUINTAL.

		1000/	100		Total
0.00	270				
0.00	200			270	0.053
0.00	140			200	0.075
0.10	100	0.1%	1	, 140	0.106
0.14	70	0.2%	2	100	0.150
1.82	50	3.6%	36	70	0.212
8.60	40	21.5%	213	50	0.300
18.62	30	62.1%	615	40	0.425
2.50	20	12.5%	124	30	0.600
0.00	10			20	0.850
0.00	5			12	1.700
0.00	3			9	3.350
% retenido X Coeficiente	Coeficiente	% de arena retenida	🖏 de arena retenida	No de tamiz	Apertura de la Malla
16/8/2019	Fecha		gramos	991	Empresa Peso de la muestra
		netria por tamizado	Analisis de Granulor		

Norma ASTM C136-01 QUNTAL S.A Quintal

		100%	991		Total
0	270				
0	200			270	0.053
0	140			200	0.075
0	100	0.1%	1	, 140	0.106
0	70	0.2%	2	100	0.150
1	50	3.6%	36	70	0.212
8	40	21.5%	213	50	0.300
18	30	62.1%	615	40	0.425
2	20	12.5%	124	30	0.600
0	10			20	0.850
0	5			12	1.700
0	3			6	3.350
% retenido X Coeficiente	Coeficiente	% de arena retenida	🗞 de arena retenida	No de tamiz	Apertura de la Malla

Entre la Malla 40 y 50 se encuentra el 82% Obervaciones :

Indice de Finura

3.9%

Elaboro :

QUINTAL.

# Anexo 2 Resultados simulaciones disco de freno

Simulación disco de freno coeficiente de convección 3 J/m $^{2*}s^{*\circ}K$ 



Simulación disco de freno coeficiente de convección 5 J/m²\*s\*°K



#### Contour Plot Temperature Scalar value) 1 / 1056-03 1 / 6020-03 1 / 6020-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 5056-03 1 / 1000-04 1 /

Simulación disco de freno coeficiente de convección 7 J/m²\*s\*°K

# Simulación disco de freno coeficiente de convección 9 J/m²\*s\*°K



#### Contrar Pict Temperature Scalar value) 1.7276-03 1.6250-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5256-03 1.5266-03 1.5

Simulación disco de freno coeficiente de convección 11 J/m $^{2*}s^{*\circ}K$ 

Simulación disco de freno coeficiente de convección 13 J/m²\*s\*°K



Concurr Piet Temperature(Scalar value) 1/2726-03 1/625-03 1/625-03 1/625-03 1/625-03 1/5276-

Simulación disco de freno coeficiente de convección 15 J/m²\*s\*°K

# Simulación disco de freno coeficiente de convección 16 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K





Simulación disco de freno coeficiente de convección 17 J/m $^{2*}s^{*\circ}K$ 

Simulación disco de freno coeficiente de convección 18 J/m<sup>2</sup>\*s\*°K

