



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE MOLDEO FENÓLICO-ISOCIANATO Y FURÁNICO EN DIFERENTES ARENAS BASE APLICADAS EN FUNDICIÓN NODULAR**

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

**ANRANGO REMACHE JEFFERSON VINICIO**  
jefferson.anrango@epn.edu.ec

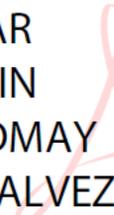
**DIRECTOR: Oscar Sotomayor, MSc.**  
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

**Quito, Noviembre 2021**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JEFFERSON VINICIO ANRANGO REMACHE**, bajo mi supervisión.

OSCAR  
EFRAIN  
SOTOMAY  
OR GALVEZ



Firmado digitalmente por OSCAR  
EFRAIN SOTOMAYOR GALVEZ  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=OSCAR EFRAIN SOTOMAYOR  
GALVEZ,  
serialNumber=190421184236,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION  
DE INFORMACION, o=SECURITY  
DATA S.A. 2, c=EC  
Fecha: 2021.11.08 21:44:23 -05'00'

---

ING. OSCAR SOTOMAYOR, MSc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **JEFFERSON VINICIO ANRANGO REMACHE**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

A handwritten signature in black ink that reads "Jefferson Anrango". The signature is written in a cursive style and is enclosed within a hand-drawn oval.

---

Jefferson Anrango

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, María y Miguel, por estar presentes en todo el largo trayecto que me ha conducido hasta aquí, por siempre creer en mí y por todo su apoyo brindado durante todo este tiempo, por ser mi motivación y ejemplo a seguir, por enseñarme a no rendirme y siempre dar lo mejor de mí. A mis hermanos, Alex y Samay, por sus palabras de ánimo, consejos y por los buenos momentos.

JEFFERSON

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por haberme dado a mi hermosa familia que siempre me ha dado su apoyo incondicional y compartido sus experiencias de vida que me conducen por el camino de una persona de bien. Gracias mamá María y papá Miguel, por estar a mi lado toda mi vida apoyándome incondicionalmente, dándome todo su amor, su experiencia y sabiduría. Alex, gracias por alegrarme los días y ser un ejemplo contra las adversidades. Samay, gracias por el cariño y dulzura que siempre lograban animarme.

A mi abuelita María y abuelito Manuel, gracias por ser mi segundo padre y madre preocupándose por mí y dándome su apoyo incondicional sin importar horario. A mi tía Lourdes y a mi tío Juanca, por las alegrías brindadas y su preocupación constante. A mi tío Juano y tía Jimena por su experiencia compartida.

Al Ing. Oscar Sotomayor por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, por su guía y soporte constante con las cuales pude completar este trabajo.

A Jeanette Cruz Gerente General, Fernando Chávez Presidente y Gerónimo Rosero ex Laboratorista de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A. por compartirme sus conocimientos en el transcurso del desarrollo de este trabajo y otorgarme los materiales requeridos para este trabajo, además de permitirme el uso de Laboratorio de Metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A.

A la empresa FUNDIRECICLAR S.A por darme la oportunidad de desarrollar mis pasantías y en ellas esta tesis.

A mi amiga Josmin, gracias por estos y muchos años más juntos, por todos los momentos buenos y malos que han forjado nuestra amistad, por tus palabras de aliento en momentos difíciles de mi carrera, por tu amistad incondicional en todo momento sin importar horario y por compartir todas tus alegrías y tristezas que han hecho de nosotros más que amigos, hermanos de diferente madre. Gracias por todo 😊 .

Giss, gracias por estar a mi lado siempre dándome ánimos a pesar de la distancia, por tu tierna presencia que trae calma a este ajetreado mundo, por este tiempo a tu lado y por tus palabras que me han ayudado a crecer como persona.

A mis amigos y amigas, compañeros de curso, de fiestas y de estudio, gracias por su compañía durante el transcurso de la carrera.

Gracias a la mejor Facultad del Mundo, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, por nutrirme con sus enseñanzas, a sus profesores por compartir su conocimiento y experiencias, por darme la oportunidad de crecer como persona en la cual conocí a mucha gente valiosa dentro y fuera de la facultad.

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	16
Pregunta de Investigación .....	17
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. Arena de moldeo .....	18
1.1.1. Arena base.....	18
1.1.2. Características de la arena base.....	23
1.2. Materiales de unión .....	26
1.2.1. Aglutinantes .....	27
1.2.2. Aglomerantes .....	29
1.3. Mezcla de moldeo .....	34
1.3.1. Sistemas de moldeo.....	35
1.3.2. Propiedades de la mezcla de moldeo .....	37
1.3.3. Sistema de mezcla de arena base y conjunto resina-catalizador.....	39
1.3.4. Recuperación de la arena que compone la mezcla moldeo.....	41
1.4. Distribución Weibull .....	42
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	45
2.1. Ensayos de arena y mezcla de moldeo.....	45
2.1.1. Metodología de recolección de muestras de arena para ensayos. ....	45
2.1.2. Determinación de la distribución del tamaño de la partícula de arena, índice de finura AFS y clasificación de la forma de grano. ....	45
2.1.3. Contenido de humedad .....	47

2.1.4.	pH.....	47
2.1.5.	LOI .....	48
2.1.6.	Proceso para hacer la mezcla de moldeo destinada a realizar probetas de tracción y permeabilidad. ....	48
2.1.7.	Resistencia a la tracción .....	50
2.1.8.	Permeabilidad .....	51
2.1.9.	Rugosidad .....	52
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	53
3.1.	Análisis de características y propiedades de la arena base .....	53
3.1.1.	Distribución, tamaño y forma de grano.....	53
3.1.2.	Clasificación de la forma de grano .....	56
3.1.3.	Contenido de humedad .....	58
3.1.4.	pH.....	59
3.1.5.	LOI .....	60
3.2.	Análisis de las características y propiedades de la mezcla de moldeo .....	62
3.2.1.	Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull .....	62
3.2.2.	Permeabilidad .....	86
3.2.3.	Rugosidad .....	98
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	103
4.1.	Conclusiones .....	103
4.2.	Recomendaciones.....	105
5.	BIBLIOGRAFÍA .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Composición química y características recomendadas de arena de sílice aplicada en la industria de fundición. ....	19
Figura 1.2. Tamaño típico de la distribución de arena de sílice. ....	19
Figura 1.3. Ejemplo de propiedades físico-químicas de arena de sílice aplicada en la industria de la fundición. ....	19
Figura 1.4. Coeficiente de expansión lineal de distintas arenas base. ....	20
Figura 1.5. Coeficiente de expansión volumétrica de distintas arenas base. ....	20
Figura 1.6. Composición química estándar de la arena de zircón. ....	21
Figura 1.7. Índice de finura AFS. ....	25
Figura 1.8. Clasificación de la forma de grano de acuerdo a la AFS. ....	26
Figura 1.9. Reacción de polimerización de resina Resol y Novolak. ....	30
Figura 1.10. Grupo funcional “uretano” en cadena lateral. ....	30
Figura 1.11. Ecuación general para la formación del grupo uretano. ....	31
Figura 1.12. Esquema de obtención de alcohol furfurílico y compuesto furano a partir de aldehído furfurílico obtenido previamente de la deshidratación de pentosa. ....	31
Figura 1.13. Reacción de condensación de alcohol furfurílico en un ambiente ácido. ....	32
Figura 1.14. Estructura del fenol-formaldehído (modificado del alcohol furfurílico condensado) endurecido por ácido p-tolueno sulfónico. ....	33
Figura 1.15. Formación de ureas mono- y dimetilol como consecuencia de la reacción entre la urea y el formaldehído. ....	34
Figura 1.16. Policondensación de derivados metílicos de urea con formación de macropartículas unidas por puentes de metileno. ....	34
Figura 1.17. Temperatura de fusión de arena de sílice de acuerdo a su pureza. ....	37
Figura 1.18. Efecto del tamaño de grano sobre la permeabilidad. ....	38
Figura 1.19. Mezcladora de tornillo Spartan 400. ....	40
Figura 1.20. Mezcladora de laboratorio UTG-130 de 10 litros de capacidad y mezcladora de arena y resina SHY, ....	40
Figura 1.21. Gráfica de Distribución de Weibull de 3 tipos de probetas de tracción con diferente cantidad y tamaño de defectos internos. (Fuente: [31]). ....	43
Figura 2.1. Diversas formas de granos de arena de Sílice. ....	47
Figura 2.2. Mezcladora de arena y resina SHY del Laboratorio de Metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A. ....	49
Figura 2.3. Máquina para fabricar probetas de mezclas de moldeo. ....	50
Figura 2.4. Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción. ....	51
Figura 2.5. Equipo de prueba de resistencia a la arena SWY. ....	51
Figura 2.6. Dimensiones de la probeta para ensayos de permeabilidad. ....	52
Figura 2.7. Medidor de Permeabilidad. ....	52
Figura 3.1. Distribución granulométrica de Cast Ball. ....	54
Figura 3.2. Distribución granulométrica de arena de sílice Sierra Central. ....	54

Figura 3.3. Distribución granulométrica de arena de sílice Sibelco. ....	55
Figura 3.4. Corindón Cast Ball, aumento de 20X. ....	57
Figura 3.5. Arena de sílice Sierra Central, aumento 20X. ....	57
Figura 3.6. Arena de sílice Sibelco, aumento 20X. ....	57
Figura 3.7. Escala de pH. ....	59
Figura 3.8. Ejemplo de uso de gráfica Weibull con resultados de resistencia de la mezcla de moldeo hecha con corindón Cast Ball-SQ-FA 1% ....	71
Figura 3.9. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-PUNB 1%. ....	73
Figura 3.10. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-PUNB 1,4%. ....	73
Figura 3.11. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-Mancuso-PUNB 1%. ....	74
Figura 3.12. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-PUNB 1%. ....	74
Figura 3.13. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-PUNB 1,4%. ....	75
Figura 3.14. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-Mancuso-PUNB 1%. ....	75
Figura 3.15. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-PUNB 1%. ....	76
Figura 3.16. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-PUNB 1,4%. ....	76
Figura 3.17. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-Mancuso-PUNB 1%. ....	77
Figura 3.18. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-FA 1%. ....	77
Figura 3.19. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-FA 1%. ....	78
Figura 3.20. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-FA 1%. ....	78
Figura 3.21. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-FA 1,4%. ....	79
Figura 3.22. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-FA 1%. ....	79
Figura 3.23. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-FA 1,4%. ....	80
Figura 3.24. Resistencia a la tracción con una probabilidad de falla de 63%, usando sistema de moldeo PUNB. ....	83
Figura 3.25. Resistencia a la tracción con una probabilidad de falla de 63%, usando sistema de moldeo FA. ....	84

Figura 3.26. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y sistema de moldeo PUNB o FA.....	84
Figura 3.27. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y sistema de moldeo PUNB o FA. ...	85
Figura 3.28. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y sistema de moldeo PUNB o FA. ....	85
Figura 3.29. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y aglomerantes fenólico-uretano o furánico a distintos tiempos de polimerización. ....	86
Figura 3.30. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y aglomerantes fenólico-uretano y furánico a distintos tiempos de polimerización. ....	87
Figura 3.31. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y aglomerantes fenólico-uretano o furánico a distintos tiempos de polimerización. ....	87
Figura 3.32. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB ShengQuan 1.4%. ....	88
Figura 3.33. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB ShengQuan 1%. ....	88
Figura 3.34. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB Mancuso 1%. ....	89
Figura 3.35. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB ShengQuan 1%. ....	89
Figura 3.36. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB ShengQuan 1,4%. ....	90
Figura 3.37. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB Mancuso 1%. ....	90
Figura 3.38. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB ShengQuan 1%. ....	91
Figura 3.39. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB ShengQuan 1,4%. ....	91
Figura 3.40. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB Mancuso 1%. ....	92
Figura 3.41. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-FA ShengQuan 1%. ....	92
Figura 3.42. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-FA ShengQuan 1,4%. ....	93
Figura 3.43. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-FA ShengQuan 1%. ....	93
Figura 3.44. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-FA ShengQuan 1,4%. ....	94

Figura 3.45. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-FA ShengQuan 1%.....	94
Figura 3.46. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-FA ShengQuan 1,4%.....	95
Figura 3.47. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con arena de sílice Sierra Central. ....	99
Figura 3.48. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con arena de sílice Sibelco.....	99
Figura 3.49. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con corindon Cast Ball. ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ejemplo de cálculo de peso individual y porcentaje retenido en cada tamiz. ....	46
Tabla 2.2. Ejemplo de cálculo del Índice de Finura AFS. ....	46
Tabla 3.1. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino. ....	53
Tabla 3.2. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino. ....	54
Tabla 3.3. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino. ....	55
Tabla 3.4. Contenido de humedad de corindón Cast Ball. ....	58
Tabla 3.5. Contenido de húmeda de arena de sílice Sierra Central. ....	59
Tabla 3.6. Contenido de humedad de arena de sílice Sibelco. ....	59
Tabla 3.7. pH de arena de sílice y corindón. ....	59
Tabla 3.8. Resultados de LOI de corindón Cast Ball. ....	61
Tabla 3.9. Resultados de arena de sílice Sierra Central. ....	61
Tabla 3.10. Resultados de arena de sílice Sibelco. ....	61
Tabla 3.11. Mezclas de moldeo para ensayos de tracción y permeabilidad. ....	62
Tabla 3.12. Aglomerantes PUNB y arenas base para elaboración de mezcla de moldeo ....	63
Tabla 3.13. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco al 1% de aglomerante. ....	63
Tabla 3.14. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad para arena con sílice Sibelco al 1,4% de aglomerante. ....	63
Tabla 3.15. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sierra Central o corindón Cast Ball al 1% de aglomerante. ....	64
Tabla 3.16. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sierra Central o corindón Cast Ball al 1,4% de aglomerante. ....	64
Tabla 3.17. Aglomerantes FA y arenas base para elaboración de mezcla de moldeo ....	64
Tabla 3.18. Cantidad de aglomerantes FA en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco, Sierra Central o corindón Cast Ball al 1% de aglomerante. ....	64
Tabla 3.19. Cantidad de aglomerantes FA en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco, Sierra Central y corindón Cast Ball al 1,4% de aglomerante. ....	65

Tabla 3.20. Media, desviación estándar y coeficiente de variación para distintas cantidades de probetas ensayadas.....	66
Tabla 3.21. Media, desviación estándar y coeficiente de variación para 20 probetas ensayadas.....	67
Tabla 3.22. Coeficiente de variación para mezclas de moldeo realizadas con sistema de moldeo PUNB (fenólico uretano).....	68
Tabla 3.23. Coeficiente de variación para mezclas de moldeo realizadas con sistema de moldeo FA (resina furánica).....	69
Tabla 3.24. Módulo de Weibull de cada mezcla de moldeo ensayada y su resistencia a la tracción con una probabilidad de falla F(V) de 63%. ....	82
Tabla 3.25. Resumen de análisis de varianza ANOVA de un factor (tiempo) para comparar datos de permeabilidad a 2, 4 y 24 horas de polimerización de una misma mezcla de moldeo, análisis realizado con un valor de significancia $\alpha=0.05$ .....	95
Tabla 3.26. Permeabilidad promedio de todas las mezclas de moldeo ensayadas. .	96
Tabla 3.27. Probabilidad como resultado de Prueba-t con $\alpha=0.05$ para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando corindón Cast Ball.....	97
Tabla 3.28. Probabilidad como resultado de Prueba-t con $\alpha=0.05$ para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando arena de sílice Sibelco. ....	97
Tabla 3.29. Probabilidad como resultado de Prueba-t con $\alpha=0.05$ para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando arena de sílice Sierra Central. ....	98
Tabla 3.30. Probabilidad resultante de análisis ANOVA realizado con un valor de significancia de $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula A. ....	100
Tabla 3.31. Rugosidad promedio de mezclas de moldeo.....	100
Tabla 3.32. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula B. ....	101
Tabla 3.33. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula C. ....	102
Tabla 3.34. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula D. ....	102

## RESUMEN

Este trabajo contiene los resultados de ensayos realizados a arenas base utilizadas en el proceso de fundición de metales, 2 tipos de arena de sílice y 1 de corindón. Para conocer las características y propiedades de estas arenas base y mezclas de moldeo aglomeradas químicamente se llevaron a cabo ensayos estandarizados como: distribución del tamaño de grano, clasificación de la forma de grano, contenido de humedad, pH, LOI, resistencia a la tracción ajustado a una distribución Weibull, permeabilidad y rugosidad. Los ensayos de tracción, permeabilidad y rugosidad fueron realizados con distintas mezclas de moldeo variando arena base y aglomerantes fenólico-uretano o resina furánica. Los resultados del ensayo de tracción fueron ajustados a una distribución Weibull donde se calculó el módulo de Weibull y la resistencia que tiene una probabilidad de falla del 63% de cada mezcla de moldeo. Los resultados de permeabilidad y rugosidad fueron evaluados mediante análisis ANOVA y T-Test.

**Palabras clave:** arena de sílice, corindón, mezcla de moldeo, distribución Weibull, análisis ANOVA y T-Test.

## ABSTRACT

This document presents test results for silica and corundum base metals casting sands. Standardized tests were carried out to understand physical and mechanical properties of the metal casting sands and molding mixtures prepared with these refractory bases: Grain distribution, grain size, grain shape classification, moisture content, pH, LOI, Weibull distribution tensile test, permeability and roughness are the properties that have been evaluated. Tensile, permeability and roughness tests were carried out with different molding mixtures changing base sand and Phenolic-isocyanate and Furanic binders. The results of the tensile test were adjusted to a Weibull distribution, Weibull modulus of each molding mixture and the strength to a probability of failure of 63% is obtained. The permeability and roughness results were subjected to ANOVA and T-Test and conclusions are presented.

**Key words:** silica sand, corundum, molding mixture, Weibull distribution, ANOVA analysis and T-test

# **ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE MOLDEO FENÓLICO-ISOCIANATO Y FURÁNICO EN DIFERENTES ARENAS BASE APLICADAS EN FUNDICIÓN NODULAR**

## **INTRODUCCIÓN**

En el proceso de fundición usando moldes de arena se usa una mezcla de moldeo que esta principalmente compuesta con arena refractaria y aglomerante o aglutinante. Dichas mezclas de moldeo presentan diferentes características y propiedades que intervienen en el desempeño del molde durante el proceso de colado y solidificación de la pieza fundida.

Actualmente en la empresa FUNDIRECICLAR S.A se está utilizando arena de sílice con aglomerantes de tipo furánico para hacer la mezcla de moldeo aplicada en el proceso de fundición, la misma que tiene un costo relativamente alto. Su costo relativamente alto genera la necesidad de explorar diferentes opciones de cambio o variación de parámetros para la mezcla de moldeo; principalmente dicha variación o cambio se centra en el cambio de arena base, aglomerantes o cantidad de los mismos.

Sabiendo que la mezcla de moldeo tiene gran influencia en la producción de piezas con fundición nodular. Al momento de decidir el cambio de los componentes de la mezcla de moldeo, es necesario realizar un estudio de las características y propiedades de la arena base y conjunto arena-aglomerantes (mezcla de moldeo). Por lo que en base al presente estudio se determinará la clase de arena con sus respectivos aglomerantes que otorguen mejores propiedades físicas y mecánicas

## **Objetivo general**

Estudiar y caracterizar sistemas de moldeo fenólico-isocianato y furánico aplicados en distintas arenas base usadas para la producción de piezas con fundición dúctil o nodular.

## **Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte respecto a los sistemas de moldeo fenólico-isocianato y furánico.
- Seleccionar ensayos normalizados por instituciones internacionales que permitan evaluar las características y propiedades de arenas base y sistemas de moldeo propuestos.

- Determinar características y propiedades de los distintos tipos de arenas base y mezclas de moldeo resultantes formadas con los sistemas de moldeo propuestos.
- Realizar un análisis BENEFICIO/costo de la aplicación de los sistemas de moldeo evaluados en la producción de piezas con fundición nodular.

### **Pregunta de Investigación**

¿Cuál es la influencia de las características de la arena base sobre los aglomerantes y mezcla de moldeo resultante aplicada en el proceso de fundición nodular?

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Arena de moldeo

La fundición de piezas metálicas es un proceso de producción utilizado durante milenios, el cual consiste en vaciar metal en estado líquido a un molde fabricado de acuerdo a la pieza a producir, se la deja enfriar y una vez solidificado el material, se separa la pieza del molde. [1][2]

La fundición en arena es el proceso más utilizado en la industria de la fundición debido a su bajo costo, disponibilidad en la industria y al ser uno de los pocos métodos que permiten el uso de materiales con alto punto de fusión como acero, níquel, titanio y sus aleaciones; de hecho, su versatilidad permite fundir piezas de varios tamaños y cantidad variable. [3][4]

La arena para moldeo es un material de suma importancia para la fundición de metales, por lo tanto, es importante que tenga características apropiadas para su uso en la fabricación de moldes de arena los cuales deben tener propiedades y características aptas para asegurar la menor cantidad de defectos en las piezas fundidas. [5]

### 1.1.1. Arena base

Es el material considerado como matriz en el cual se añadirá aglomerante o aglutinantes y aditivos (opcional) para formar la mezcla de moldeo que será usada para la fabricación de moldes y/o machos.

#### **Arena de sílice**

La arena de sílice debido a su disponibilidad y bajo precio es la más usada como arena base en mezclas de moldeo (conjunto arena-aglomerantes). Este tipo de arena es muy usada por sus buenas propiedades, entre las que destacan: resistencia al fuego y buena conductividad térmica haciéndola ideal para fundición de materiales con puntos de fusión relativamente elevados, como: aluminio, cobre y sus aleaciones, acero y sus aleaciones. La composición química recomendada de arena de sílice aplicada en la industria de fundición, se muestra en la Figura 1.1.

Parameter (%)	Coarse	Medium	Fine
Clay	0.15	0.18	0.29
LOP <sup>a</sup>	0.058	0.072	0.085
pH	7	7.1	7.4
ADV <sup>b</sup>	0.5	0.8	1.7
Grain shape	Rounded	Rounded	Rounded
SiO <sub>2</sub>	99.75	99.65	99.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55	0.065	0.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.016	0.018	0.035
TiO <sub>2</sub>	0.010	0.011	0.016
CaO	0.011	0.012	0.02
MgO	0.008	0.009	0.018

Figura 1.1. Composición química y características recomendadas de arena de sílice aplicada en la industria de fundición.  
(Fuente: [6])

Este tipo de arena se caracteriza por otorgar una buena calidad superficial a las piezas fundidas con un bajo consumo de aglomerante, esto se debe a que la mayoría de arenas de sílice tienen a sus granos de arena en un rango dimensional de entre 200-250  $\mu m$ . Sin embargo, cuanto más fina es la arena de sílice más aumenta el aglomerante requerido para obtener una buena unión entre los granos de arena y disminuye la permeabilidad de la mezcla de moldeo. [6]

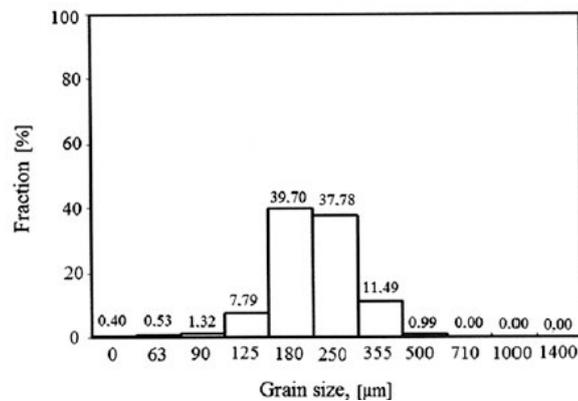


Figura 1.2. Tamaño típico de la distribución de arena de sílice.  
(Fuente: [6])

Parameter	Value	Effect
Grain number	50-60 AFS	Good final surface of a casting, lower binder consumption
Average grain size	220-250 $\mu m$	
Dusts content (below 200 mesh = 74 $\mu m$ )	Max. 2%	Lower binder consumption
Clay content below 20 $\mu m$	Max. 0.5%	Lower binder consumption
Specific surface	120-140 $cm^2/g$	Lower binder consumption
Dry permeability	120-150 units	Reduction of defects of gaseous origin

Figura 1.3. Ejemplo de propiedades físico-químicas de arena de sílice aplicada en la industria de la fundición.  
(Fuente: [6])

La arena de sílice se caracteriza por un alto coeficiente de expansión, lineal ( $\alpha$ ) y volumétrico ( $\beta$ ) durante el calentamiento, esto contribuye a que en fundiciones de metales con alto punto de fusión como el titanio y sus aleaciones, presenten defectos de fundición. En las figuras 1.4. y 1.5. se muestra la comparación de coeficientes de expansión lineal ( $\alpha$ ) y volumétrico ( $\beta$ ) de diferentes arenas base. [7]

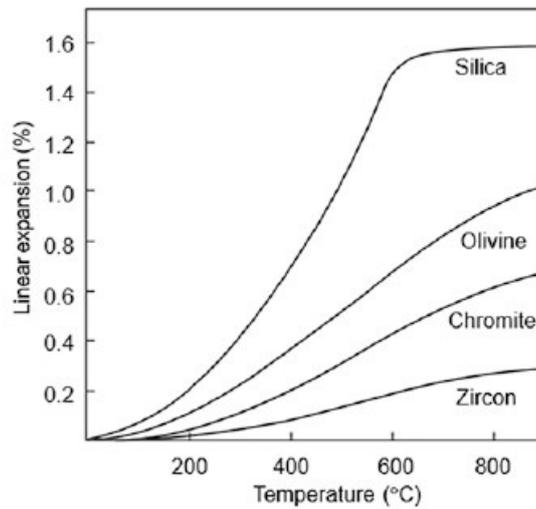


Figura 1.4. Coeficiente de expansión lineal de distintas arenas base. (Fuente: [6])

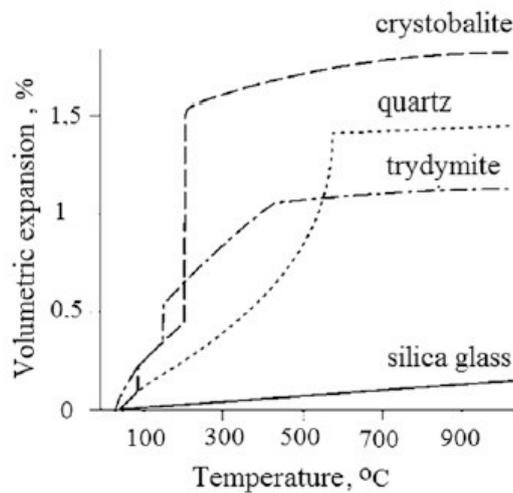


Figura 1.5. Coeficiente de expansión volumétrica de distintas arenas base. (Fuente: [6])

Una de las principales desventajas de la arena de sílice es su toxicidad, debido a que es peligrosa cuando se inhala; el personal que transporta, forma y produce moldes o machos, despacha arena, maneja piezas fundidas, etc. Debe portar siempre equipo de protección que eviten que partículas finas de arena de sílice sean inhaladas. Los principales problemas de salud relacionados con este tipo de arena son: silicosis pulmonar, cáncer de pulmón, enfermedades respiratorias y renales. [8]

### Arena de zircón

Debido a sus propiedades físico-químicas como bajo coeficiente de expansión térmica lineal observable en la Figura 1.4., alto peso específico, alta resistencia a altas temperaturas hasta 2400°C, disminuye la penetración de metal líquido a través de las paredes del molde dando un buen acabado superficial. El alto costo de este tipo de arena limita su uso para aleaciones especiales con alto punto de fusión. La composición química de esta arena se muestra en la Figura 1.6.

Compound	Content (%)
ZrO <sub>2</sub> + HfO <sub>2</sub>	63.06–65.50
TiO <sub>2</sub>	0.26–0.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05–0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13
SiO <sub>2</sub>	33.1
U and Th	Max. 260 ppm

Figura 1.6. Composición química estándar de la arena de zircón.  
(Fuente: [6])

Su bajo coeficiente de expansión térmica disminuye defectos relacionados con la contracción térmica de los metales cuando estos se enfrían. Su conductividad térmica 30% superior al de la arena de sílice favorece al enfriamiento rápido haciéndola ideal para su uso en moldes hechos en cera perdida. [6]

Una de las principales desventajas de la arena de zircón es que puede contener elementos radiactivos naturales como el torio y/o uranio, por tal razón los operadores que manejan el transporte y uso de este tipo de arena tienen que tener las debidas protecciones contra radiación. [9]

### Arena de olivino

La arena de olivino es una mezcla de fosterita (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) y fayalita (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) en una proporción de 90% y 10% respectivamente. Este tipo de arena es mayormente usada para la producción de aceros de alta aleación, principalmente aceros de alto contenido de magnesio, el óxido de magnesio se produce al entrar en contacto el magnesio con oxígeno a altas temperaturas, no reacciona con este tipo de arena por lo que quemaduras que se pueden producir por dicha reacción violenta no dañan la estructura interna ni acabado superficial de la pieza fundida. [10]

La arena de olivino tiene un bajo coeficiente de expansión térmica como se observa en la Figura 1.4. permitiendo la obtención de fundiciones de alta precisión dimensional y alta calidad superficial, alta resistencia al shock térmico el cual reduce significativamente el problema de la expansión de la arena de moldeo, alto ADV (altamente alcalino) por lo tanto

no se debe aplicar con sistemas de moldeo que usan ácidos como catalizadores (sistema de moldeo con resina furánica) solamente se puede aplicar sistemas de moldeo basados en aglomerantes de curado lento. La forma de sus granos es muy irregular razón por la cual necesita grandes cantidades de aglomerantes para obtener una buena unión entre sus granos.

### **Arena de cromita**

La arena de cromita es ampliamente usada en la fabricación de piezas fundidas de acero debido a su bajo coeficiente de expansión térmica observable en la Figura 1.4. y considerablemente más alta conductividad térmica que su homóloga arena de sílice. Por lo tanto, su uso se lo hace en combinación con arena de sílice de la siguiente manera; la arena de cromita se usa como arena de cara mientras que la arena de sílice se usa como arena de relleno. Esta combinación puede generar dificultades en el proceso de reciclaje de arena, por lo tanto, la separación de la misma se la hace con ayuda de fuertes campos magnéticos (la cromita es magnética). Sin embargo, si esta separación no ocurre, una alta cantidad de arena de sílice en la arena de cromita hace que empeore la resistencia a altas temperaturas, el porcentaje de concentración de arena de sílice debe ser menor al 1%. [6]

### **Corindón**

Es un mineral formado principalmente por óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), puede tomar diversas tonalidades dependiendo el tipo de impurezas que se presenten: blanco, pardo, violeta, etc. En la industria de la fundición se usa el corindón de coloración negra (debido a la presencia de óxido férrico  $Fe_2O_3$ ), de forma redonda o subangular. Tiene menor coeficiente de expansión térmica que su homóloga de sílice, elevada permeabilidad debido a la naturaleza de sus granos y tiene excelente resistencia a altas temperaturas lo que la hace ideal para metales con altos puntos de fusión como titanio, aceros o fundiciones.

### **Otros minerales usados como arena base**

Las arenas presentadas anteriormente constituyen materiales de moldeo agregados básicos. Los precios bajos de la arena de sílice suelen ser el argumento más destacable a la hora de elegir esta arena base, pero su influencia negativa en la salud de los empleados y el medio ambiente la vuelve insatisfactoria para su uso. Por lo tanto, la industria de la fundición constantemente está buscando nuevas arenas bases las cuales satisfagan requerimientos tecnológicos, ecológicos y saludables. [11]

**Arenas de aluminio-silicato:** Representantes de este grupo de arenas son estaurolita y kervalita. Son aplicadas en la industria de la fundición de aleaciones de aluminio y magnesio.

**Escoria de hierro y cromo:** este material puede sustituir a la arena de sílice total o parcialmente, se obtiene propiedades muy similares a la mezcla de moldeo hecha con arena de sílice.

### **Arenas sintéticas**

En el mercado de arenas base para fundición también existen arenas sintéticas con excelentes propiedades, pero no se aplica ampliamente debido a su alto costo. Entre las arenas sintéticas más conocidas tenemos: cerebeads, sílice fundida y arenas de carbono. [12]

**Cerebeads:** está compuesta de cerámica sintética llamada mullita ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) se obtiene en condiciones de alta presión y temperatura, posee una resistencia térmica muy similar a la arena de zircón por lo que la hace ideal para fundiciones de acero. No se quema y es muy resistente a la penetración de metal líquido otorgando un excelente acabado superficial y su coeficiente de expansión térmica es prácticamente cero.

**Sílice fundida:** La sílice fundida se obtiene como resultado del enfriamiento ultrarrápido de la sílice idealmente pura, fundida o gaseosa, obtenida artificialmente. Se caracteriza por tener un coeficiente de expansión térmica muy cercano a cero además de una elevada resistencia al shock térmico.

**Arenas de carbono:** Estas arenas se pueden obtener a partir del coque fluido de petróleo calcinado. Este tipo de arena se caracteriza por sus excelentes propiedades: buena permeabilidad, baja expansión térmica, resistencia a los choques térmicos, pequeña densidad aparente, alta conductividad térmica, alta resistencia a la compresión y buena fluidez. [13]

### **1.1.2. Características de la arena base**

En el mercado existen varios tipos de arena base, debido a la gran cantidad de estas, las características para definir la buena calidad de una arena son: contenido de humedad, la composición química, distribución granulométrica, morfología de grano y número de fineza AFS.[14]

#### **Contenido de humedad**

El contenido de humedad de las arenas se determina por la diferencia de peso de la arena húmeda y la misma arena después del secado a 93°C o 110°C aproximadamente, el resultado se debe expresar en porcentaje de acuerdo al procedimiento AFS 1125-00-S de Mold & Core Test Handbook.[14] [5]

En la preparación de la mezcla de moldeo se necesita que el contenido de humedad sea menor a 0.2% para la activación de aglomerantes evitando un largo tiempo de endurecimiento y disminución de la resistencia. [6]

### **Composición química**

Las arenas de moldeo son rocas sedimentarias donde su principal componente es el cuarzo (sílice) resultado de una sucesiva separación de sustancias minerales. Para la preparación de mezclas de moldeo se emplean con frecuencia arenas cuarzosas, las cuales se encuentran en grandes cantidades en la naturaleza y, por lo tanto, son de bajo costo con las propiedades necesarias. [5]

En el presente caso de estudio se hace principal énfasis a la arena de sílice (por su uso en la empresa FUNDIRECICLAR S.A) y corindón debido a que es una opción para el cambio de arena base. La arena de sílice su composición química es en su mayoría  $\text{SiO}_2$ , posee un punto de fusión de  $1713^\circ\text{C}$  la presencia de impurezas disminuye la temperatura de fusión, su coeficiente de expansión lineal varía de 0% a 1,6% haciéndola ideal para minerales con altos puntos de fusión. Además de sílice, la arena puede contener impurezas como minerales arcillosos, hidróxido de hierro, carbonatos, feldespato, mica, etc. Estas sustancias que dan a la arena colores variados pero la alta concentración de las mismas disminuye el punto de fusión de la arena de sílice. [15]

La arena de sílice es inerte a diversos agentes químicos, salvo al ácido fluorhídrico que la ataca fuertemente, a elevada temperatura reacciona con los óxidos básicos formando silicatos ácidos, reacciona con el manganeso siendo su uso preferencialmente en aceros o fundiciones con bajas concentraciones de dicho elemento. [16]

### **Granulometría e índice de finura AFS**

El análisis granulométrico de la arena tiene por objeto determinar las cantidades en que están presentes partículas de ciertos tamaños del material[17]. Con la finalidad de determinar el tamaño de grano promedio o finura AFS se realiza un ensayo dado por el procedimiento AFS 1105-12-S de MOLD & CORE TEST HANDBOOK, se coloca una muestra de arena de 50 gr en una serie de tamices de varios tamaños de malla, se lo hacer vibrar durante 15 minutos en un equipo llamado Ro-Tap y se pesa en forma acumulada la arena retenida en cada uno de los tamices. [14]

El tamaño de los granos de arena tiene una importancia fundamental sobre el acabado de las piezas, permeabilidad, refractariedad y la cohesión o resistencia de la arena. La arena principalmente está constituida por arcillas de diferente naturaleza, polvos finos de la misma arena y de material orgánico con tamaño de partículas menores a  $20\ \mu\text{m}$ . [16]

En cuanto a la “finura” de las arenas para su empleo en fundición, estas se pueden clasificar en 5 grupos:

ARENA	AFS	EN MICRONS
Muy Fina	110 – 140	140 - 110
Fina	70 – 110	230 - 140
Media	55 - 70	300 - 230
Gruesa	45 - 55	370 - 300
Muy Gruesa	25 - 45	700 - 370

Figura 1.7. Índice de finura AFS.  
(Fuente: [18])

Las arenas “Muy Finas” son muy empleadas para el moldeo en fundiciones de base cobre y de base aluminio. Las arenas “Finas” son muy frecuentemente empleadas para la fabricación de las arenas pre-revestidas (proceso cáscara), producciones de pequeñas piezas altamente aleadas, y cuando se requieren piezas de poco espesor que necesitan de un gran acabado superficial. Las arenas “Medias” son las arenas estándar para la fabricación de moldes para su empleo en las fundiciones de base hierro gráficas. Las arenas “Gruesas” son las empleadas fundamentalmente en las arenas para las fundiciones de acero moldeado. Las arenas “Muy Gruesas”, son en general empleadas en la fabricación de calderas, donde se necesita una gran permeabilidad.[19]

Es importante destacar que el número de finura AFS es solo una rápida referencia para describir el tamaño medio de las partículas de una muestra de arena dada, no tiene demasiado sentido en sí mismo ya que se puede obtener el mismo número de finura AFS y en consecuencia el mismo tamaño medio de grano con distribuciones de granos totalmente diferentes. La distribución de los diferentes tamaños de grano, es decir el porcentaje de arena retenido sobre cada tamiz (Histograma), da una mucha mejor visión de cómo están los granos cercanos entre sí (homogeneidad o empaquetados juntos), cuando se forme un molde o un macho.[20][5][9]

### **Morfología de la arena base**

De acuerdo a la AFS, la arena se clasifica en 4 tipos dependiendo el tipo de grano, como se muestra en la Figura 1.8:

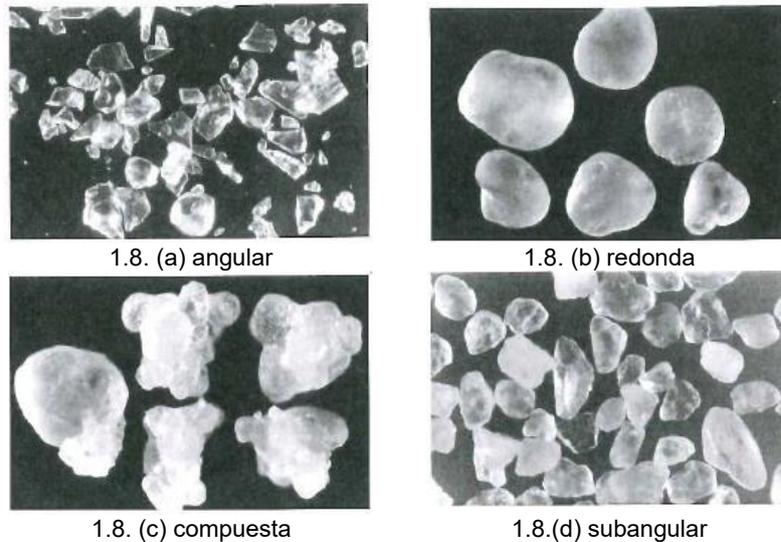


Figura 1.8. Clasificación de la forma de grano de acuerdo a la AFS.  
(Fuente:[14])

El grano redondeado es propio para el moldeo en cascara, granos angulares requieren mayor cantidad de aglomerante por su forma irregular para obtener buenas propiedades, granos subangulares ofrecen mejor compactación, homogeneidad en los granos, menor permeabilidad, cohesión y aptitud al moldeo intermedia entre el grano angular y redondeado. Granos redondeados y homogéneos presentan un mejor empaquetamiento no cruzado facilitando el paso de aire, es decir tiene alta permeabilidad. [21]

Es importante conocer la forma y el porcentaje de polvo fino presente en la arena base, puesto que: formas regulares favorecen el bajo consumo de aglomerantes y/o aglutinantes para lograr una resistencia adecuada que no presente problemas al momento de verter el metal líquido sobre el molde, por otra parte una alta concentración de polvo fino aumenta el consumo de aglomerante y/o aglutinante para lograr una resistencia adecuada. [22]

## 1.2. Materiales de unión

La función de los materiales de unión es brindar cohesión entre los granos de arena refractaria otorgando resistencia, los materiales de unión no son altamente refractarios por tal razón, la resistencia deseada debe ser obtenida con la mínima cantidad posible. Los materiales de unión deben cumplir con las siguientes características:

- 1) Distribuirse uniformemente por la superficie de los granos de la arena base.
- 2) Asegurar la suficiente resistencia para evitar que el molde se dañe antes y durante del vertido del metal líquido.
- 3) Darle a la mezcla plasticidad para que esta llene todas las cavidades del molde.

- 4) No adherirse al modelo ni a la caja del modelo al elaborar moldes.
- 5) Favorecer el rápido secado del molde, no absorber humedad durante el montaje del molde o tiempo de espera hasta verter el metal líquido.
- 6) No desprender muchos gases durante el secado y el vaciado del metal líquido.
- 7) No disminuir la capacidad refractaria de la arena de moldeo.
- 8) Favorecer la fácil extracción de la pieza fundida
- 9) No ser nocivo para los operarios (no dañar la piel y no desprender gases nocivos), ser de bajo costo y no escasos.

### 1.2.1. Aglutinantes

Los granos de moldeo de arenas en verde son adheridos con arcillas. En el moldeo de arenas naturales la arcilla ya se encuentra incluida en la composición de la arena, en cambio en arenas sintéticas cuando se usa arcilla, esta proviene de depósitos externos.

Generalmente la forma estructural de las arcillas es muy similar a diminutos platos de un tamaño aproximado comprendido entre  $0,01 - 1 \mu m$  de diámetro, propiedades como la plasticidad y adherencia son desarrolladas cuando se agrega de agua. [11]

En la industria de la fundición existen dos tipos de arcillas: Kaolita o Fireclay y Montmorillonita o Bentonita. La Bentonita incluye “western or sodium bentonite” o bentonita occidental o de sodio y “southern or calcium bentonite” o bentonita del sur o de calcio. Cada tipo de arcilla posee diferentes propiedades, a veces las combinaciones de arcillas se realizan con el fin de obtener las mejores propiedades de cada una en una única mezcla.[23]

**Fireclay o kaolita:** es usada como aglutinante en arenas de moldeo para obtener una buena resistencia a altas temperaturas. Las combinaciones de kaolita con bentonita occidental logran una buena resistencia a altas temperaturas. La mezcla de moldeo con kaolita requiere 12% a 15% del peso de arcilla y de 5% a 8% del peso de agua.

**Bentonita:** su porcentaje en la mezcla de moldeo es entre 3% a 6% de arcilla y de 2,5% a 4% de agua para este aglutinante.

**Western Bentonite o bentonita occidental:** es una arcilla que aumenta su tamaño de 10 a 20 veces al volumen original. Tiene una buena resistencia en altas temperaturas evitando la erosión y desmoronamiento mientras el metal líquido fluye a través del molde. La mezcla de moldeo con bentonita occidental tiene menos fluidez para acoplarse a la forma del molde es decir es más gomosa y rígida que la bentonita del sur.

**Southern Bentonite o bentonita del sur:** otorga buena fluidez para acoplarse al negativo del molde y tiene buena resistencia a la compresión que su homóloga occidental. Se desmorona fácilmente lo que hace necesario el uso de aditivos.

#### **Aditivos para arenas en verde**

Los aditivos principalmente se usan cuando la mezcla de moldeo está compuesta principalmente de arena base, arcilla y agua. Las principales funciones de los aditivos son: incrementar la resistencia en verde, evitar o disminuir la colapsabilidad por la expansión de las arcillas como la bentonita occidental que aumenta de 10 a 20 veces su tamaño, mejora la calidad superficial de las piezas fundidas y mejora la densidad de la arena de moldeo para resistir la penetración del metal líquido.[23]

**Wood flour o harina de madera:** se tratan de mazorcas de maíz molidas o cualquier tipo de celulosa, es añadida para disminuir la expansión de la mezcla de moldeo a temperaturas de entre 204°C a 315°C. Disminuye la colapsabilidad y mejora la fluidez de la mezcla de moldeo. Se añade en cantidades entre 2% a 5% del peso de la mezcla de moldeo, la adición excesiva puede ocasionar superficies rugosas debido a que el metal líquido penetra a través de los granos de arena mientras la celulosa se quema.

**Seacoal o coal-dust o polvo de carbón:** es añadido para mejorar la calidad superficial y facilitar la limpieza de fundiciones de hierro debido a que la arena de moldeo se desprende fácilmente. El tamaño del polvo de carbón debe ser muy similar al de la arena base para no disminuir la permeabilidad.

**Harina Sílice:** es una arena muy fina que es retenida por los tamices “ASTM E-11” 200, 270 y PAN, es añadida para incrementar la resistencia en altas temperaturas y resistir la penetración del metal, también se puede usar arena fina olivino, cromita y zirconio.

**Grafito:** se añade en cantidades que varían desde 0,2% a 2% del peso de la arena base, el grafito es usado en moldes para mejorar la calidad superficial de las piezas fundidas.

**Cereales:** puede ser harina de trigo, maíz o centeno, es añadida en cantidad de 2% del peso de la arena base. En mezclas de moldeo con arcilla los cereales confieren un incremento en la resistencia en seco, contribuyen en la tenacidad en verde e incrementan la resistencia ante la friabilidad (facilidad de desmenuzarse) .[11]

**Dextrina:** es un tipo de cereal que otorga alta resistencia en seco y permite un alto detalle en los bordes del molde.

**Melaza:** su preparación es diluida en una proporción de 10 a 1 de melaza y agua respectivamente, es usada para la fabricación de mezclas de moldeo para machos y como aglutinante adicional en el conjunto arcilla-arena.

**Fuel oil o Keroseno:** debe ser añadido en cantidades muy pequeñas de 0,01% a 0,1% del peso de la arena base, mejora la fluidez y previene el rápido secado de los bordes del molde. Puede ser reemplazado por el polvo de carbón.

### **1.2.2. Aglomerantes**

Los aglomerantes químicos o resinas sintéticas tienen su origen en el campo de la manufactura de machos. Tradicionalmente se usaban aglutinantes basados en aceites secantes como el aceite de linaza, otorgando a la mezcla de moldeo una combinación efectiva de las propiedades requeridas para la manufactura de machos como alta resistencia en seco y colapsabilidad.

Enfatizando la importancia de la permeabilidad, resistencia y colapsabilidad de machos y mezcla de moldeo; una amplia variedad de conjuntos resina-catalizador han sido desarrolladas y usadas actualmente en la industria de la fundición[9]:

- Resinas alquídicas o Resins Alkyd
- Resinas de fenol-formaldehído o Phenol-formaldehyde resins
- Sistema aglomerante de fenol-uretano o Phenol-urethane binder system
- Resina Furánica o Furan resins
- Resinas de urea-formaldehído o Urea-formaldehyde resins

#### **Resinas Alkyd o alquídicas**

Las resinas alquídicas se forman mediante la reacción de policondensación de anhídrido de ácido ftálico, glicerina y aceites en presencia de catalizadores en solución. Dependiendo de la longitud, el método de polimerización y los componentes utilizados, obtienen diversas características y propiedades. Tomando en consideración las propiedades de los ácidos grasos y aceites vegetales contenidos en las resinas alquídicas, estas pueden dividirse dentro de dos grupos principales[6]:

- Polimerizadas a temperatura ambiente: estas resinas tienen la habilidad de polimerizar a temperatura ambiente en presencia de oxígeno, para acelerar el proceso de endurecimiento se usan como catalizadores: sales de cobalto, manganeso o calcio.

- No polimerizadas a temperatura ambiente: las resinas pertenecientes a este grupo requieren de catalizadores en base a aminas para iniciar su proceso de polimerización.

### Resinas fenol-formaldehido

Formadas por fenol (también llamado hidroxibenzeno) y formaldehido (También llamado metanal o aldehído fórmico), la reacción de policondensación entre el fenol y formaldehido es catalizado por iones de hidrógeno y iones hidroxilo en una solución acuosa. Dependiendo el pH del ambiente donde ocurre de reacción y la cantidad de agentes reactantes (fenol y formaldehido) se obtiene dos tipos de resinas: resinas novolak y resinas resol. La reacción de polimerización de ambos tipos de resinas se observa en la Figura 1.9. El polímero formado por las resinas novolak y resol es el mismo, la diferencia constituye en el hecho de que las resinas resol no contienen hexametilentetramina.[6]

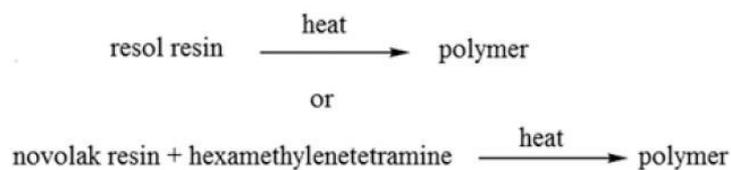


Figura 1.9. Reacción de polimerización de resina Resol y Novolak  
Fuente: [6]

### Sistema de aglomerantes fenólico-uretano

Se denomina “uretano” a un grupo funcional, en el cual un átomo de carbón está conectado con los grupos  $(-OR)$  y  $(-NR_2)$  donde R es un grupo radical o cadena lateral. Por lo tanto, el grupo reactivo es  $(-O - CO - NH-)$  Siendo un intermedio entre carbonato y urea, Figura 1.10.

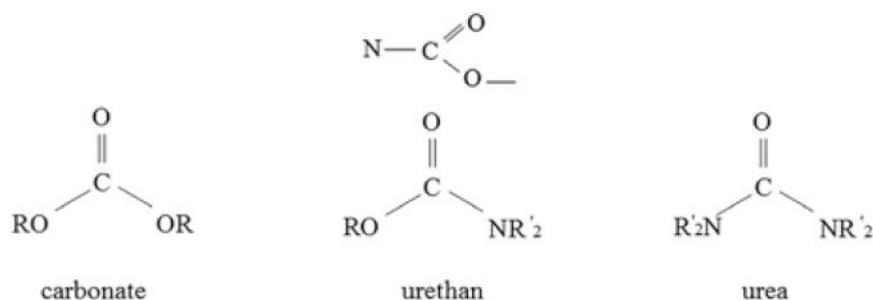


Figura 1.10. Grupo funcional “uretano” en cadena lateral.  
(Fuente: [24])

El sistema fenólico-uretano está conformado de 3 partes, la resina fenol-formaldehido (parte I), isocianato (parte II) y amina como catalizador (parte III). Durante el proceso de fabricación se añaden solventes a las partes I y II para disminuir la viscosidad e incrementar

la reactividad de estas, es decir tengan mayor afinidad entre ellas y con el catalizador. La amina usada como catalizador puede ser aplicado de dos maneras: líquido (phenolic-urethane no-bake process, PUNB) o gaseoso (phenolic-urethane cold-box process, PUCB). La formación del grupo uretano es esquematizada en la Figura 1.11.

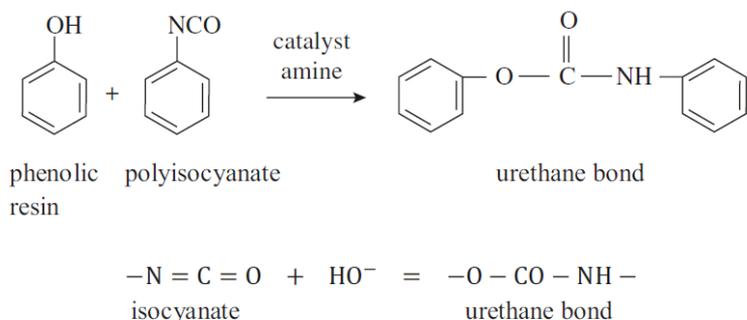


Figura 1.11. Ecuación general para la formación del grupo uretano.  
(Fuente: [6])

### Resina Furánica

La materia prima principal para la producción de resina furánica es el aldehído de furfurilo (furfural) el cual es obtenido por la deshidratación de azúcares pentosa, contenidos en desechos orgánicos (cáscaras de arroz, avena, restos de algodón, mazorcas de maíz, etc.) por medio de la acción de ácidos inorgánicos.

A partir del aldehído de furfurilo se obtienen 2 componentes (Figura 1.12): como resultado de la separación catalítica de la partícula de óxido de carbono (descarbonización) se obtiene el furano y por deshidrogenación con catalizadores de cobre o cromo se obtiene el alcohol furfurílico, compuesto que se usa para la fabricación de resina furánica.

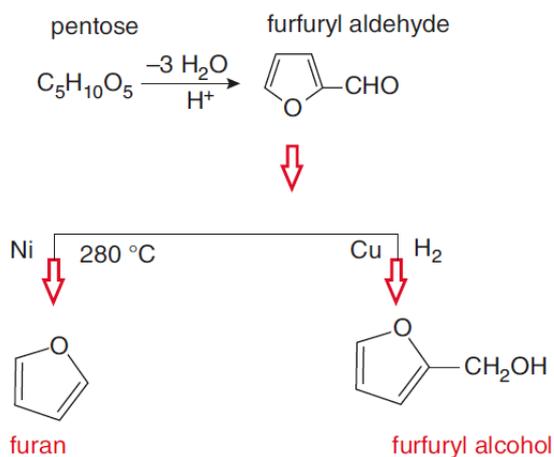


Figura 1.12. Esquema de obtención de alcohol furfurílico y compuesto furano a partir de aldehído furfurílico obtenido previamente de la deshidratación de pentosa.  
(Fuente: [6])

Los monómeros de alcohol furfurílico pueden ser formados gracias a dos mecanismos:

- Poliadición: este proceso es iniciado por un radical libre, catiónico o aniónico. Como resultado se obtienen macropartículas con anillos laterales de furano en la cadena principal.
- Policondensación: reacción de condensación catalizada por ácido (pH= 3-5, temperatura 80-100°C) donde se obtienen polímeros o copolímeros con anillos furano en la cadena principal. Este método es el mayormente usado para obtener resinas furánicas, Figura 1.13.

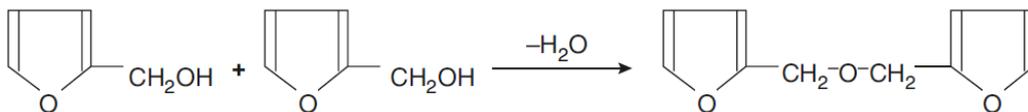


Figura 1.13. Reacción de condensación de alcohol furfurílico en un ambiente ácido.  
(Fuente: [6])

Los agentes químicos usados para endurecer a la resina furánica pueden ser ácidos orgánicos e inorgánicos. La presencia de anillos furánicos otorga la posibilidad de endurecimiento a temperatura ambiente. Estos catalizadores pueden ser fuertes ácidos sulfónicos aromáticos, p-tolueno sulfónico (PTS), benceno sulfónico (BS) o xileno sulfónico (XSA), a veces se usa soluciones diluidas de ácido sulfúrico o fosfórico. El proceso de endurecimiento de resinas furánicas es un proceso altamente exotérmico que puede ser acelerado por elementos externos como calor, oxígeno, ultrasonido o adiciones de fenol o urea.

En la industria de la fundición se utilizan resinas furánicas modificadas por urea, formaldehído y/o fenol, estos compuestos producen resinas urea-formaldehído-furánica o fenol-formaldehído-furánica. Estas modificaciones se basan en la introducción de uno de los componentes antes mencionados en una solución de resina dada. La modificación de resina furánica tiene como objetivo disminuir la cantidad de alcohol furfurílico libre, por debajo del 25% de contenido de alcohol furfurílico libre se considera como resina peligrosa y por encima del mismo porcentaje se la considera tóxica.

La estructura de la resina furánica-formaldehído endurecida por ácido p-tolueno sulfónico es mostrada en la Figura 1.14.

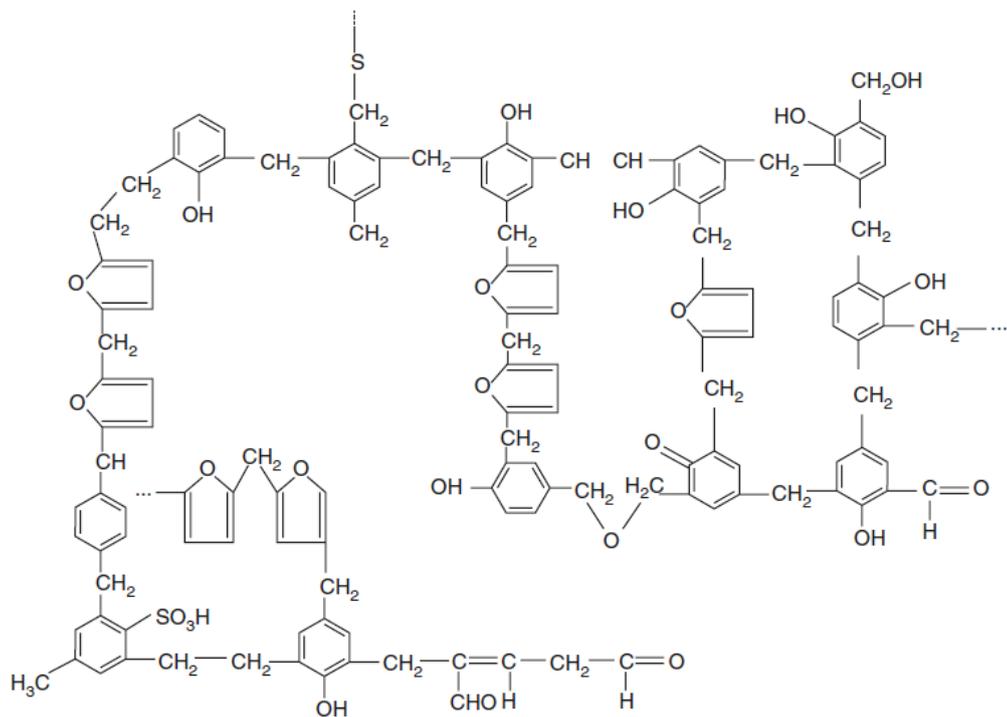


Figura 1.14. Estructura del fenol-formaldehído (modificado del alcohol furfúrico condensado) endurecido por ácido p-tolueno sulfónico.  
(Fuente: [6])

El alcohol furfúrico condensado es comúnmente aplicado como aglomerante en varios sistemas de moldeo o manufactura de machos como: hot-box, warm box, endurecimiento de arena de moldeo en frío y endurecimiento de la arena de moldeo por un endurecedor gaseoso.

### Resinas de Urea-Formaldehído

Las resinas de urea-formaldehído estas formados en una reacción de dos etapas. La primera etapa se da una reacción de urea con formaldehído bajo condiciones neutras o ligeramente alcalinas, que conduce a la producción de ureas mono- y dimetilol, que tienen un grupo hidroximetilo ( $-CH_2OH$ ) Figura 1.15.

Durante la segunda etapa la urea hidroximetilada se condensa bajo ligeras condiciones ácidas para formar puentes metileno ( $-CH_2-$ ) entre las moléculas de urea (Figura 1.16.) dando origen a la resina urea-formaldehído.

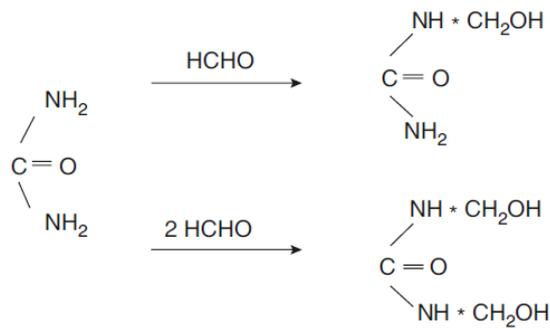


Figura 1.15. Formación de ureas mono- y dimetilol como consecuencia de la reacción entre la urea y el formaldehído.  
(Fuente: [6])

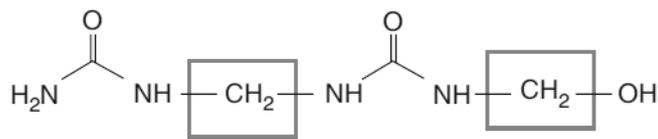


Figura 1.16. Policondensación de derivados metílicos de urea con formación de macropartículas unidas por puentes de metileno.  
(Fuente: [6])

En las resinas de urea-formaldehído el endurecimiento es iniciado cuando se añade ácido (principalmente es ácido fosfórico) o puede ocurrir cuando la temperatura incrementa a 120°C con pH<5.

En el ámbito de aplicaciones de fundición rara vez se usan resinas de urea-formaldehído como aglomerantes de una arena de moldeo. El más utilizado son las resinas urea-formaldehído-furfurílico, la cual es usada en la tecnología de moldeo “hot box” o Thermoschock, los catalizadores en esta tecnología son ácido sulfónico (VI) o fosfórico (V). La razón por la cual no se usa como aglomerante la resina urea-formaldehído, es debido a que, durante la preparación del molde con dicho aglomerante, vapor de formaldehído es emitido a la atmósfera de trabajo mientras se endurece siendo peligroso y dañino a corto y mediano plazo para los trabajadores. [6][25]

### 1.3. Mezcla de moldeo

La mezcla de moldeo se define a la mezcla de materiales orgánicos o inorgánicos con la arena base formando una mezcla homogénea ideal para tomar la forma del molde y resistir el colado de metal líquido dentro del mismo.

### **1.3.1. Sistemas de moldeo**

Una característica especial del sistema del moldeo No-bake es la cantidad de aglomerantes necesarios para alcanzar buenas propiedades en la mezcla de moldeo resultante, son necesarias cantidades inferiores a 2% de conjunto resina-catalizador y en algunos casos menores a 1% pueden ser suficientes.

#### **Sistema de Moldeo Fenólico-Uretano No-Bake (PUNB)**

La arena base aglomerada con aglomerante fenólico uretano (PU) puede ser clasificado de acuerdo a la forma en la cual se agrega el catalizador, por lo tanto, tenemos: sistema fenólico-uretano autofraguante (PUNB) o sistema fenólico-uretano endurecido por gas (PUCB). En ambos casos el mecanismo de aglomerado es similar, la única diferencia reside en la aplicación del catalizador; en PUNB el catalizador se añade en la mezcla como amina en estado líquido mientras que en PUCB el catalizador es amina gaseosa que se inyecta en un molde herméticamente sellado endureciéndose rápidamente.

El sistema de moldeo fenólico-uretano independientemente de la marca que sea, consiste en 3 partes: resina de fenol formaldehído (Parte I), solución disocianato (Parte II) y amina terciaria en estado líquido (Parte III). El proceso de endurecimiento ocurre como resultado de la reacción de resina fenol-formaldehído con el isocianato en presencia del catalizador (amina).

La cantidad de aglomerante generalmente usada para formar la mezcla de moldeo es: Parte I (resina) entre 0,5% a 0,8%, Parte II (disocianato) entre 0,5% a 0,8% de la cantidad total de arena y el catalizador (amina) 12% de la cantidad de la Parte I (resina).

En ocasiones las proporciones son dadas por los fabricantes de resinas, estos recomiendan usualmente usar: Parte I y Parte II en proporciones 55:45, 60:40 y 50:50 de la cantidad total de aglomerante que puede estar entre 1% a 3% en función de la cantidad total de arena. La parte III se añade en función de la parte I, usualmente esta entre 1-3% en peso de la parte I. [1]

El sistema auto fraguante fenólico-uretano contiene en su composición nitrógeno comprendido entre 3% a 11%. La presencia de nitrógeno produce porosidades superficiales en la fundición de hierro, así como con el carbono brillante (en fundiciones de hierro). En orden de reducir los defectos de fundición relacionados con la presencia de nitrógeno, la relación más utilizada es 60:40 siendo la Parte I favorecida debido que la mayor parte del nitrógeno se encuentra en la Parte II.

La influencia de la humedad sobre las propiedades de la mezcla de moldeo usando resina fenólico-uretano (PUNB) es similar a la influencia negativa que tiene la humedad y sus diferentes fuentes sobre la mezcla de moldeo usando resina furánica (FA). El tiempo de polimerización relativamente corto del sistema PUNB hace que la humedad tenga poco tiempo para afectar a la mezcla de moldeo, si bien la humedad afecta a las propiedades mecánicas de la mezcla de moldeo, este efecto negativo será menor que el efecto presente al usar resina furánica (FA).[6]

### **Sistema de moldeo con resina furánica (FA)**

El sistema de moldeo con resina furánica (FA) es comparable al sistema de moldeo con resina fenólico-uretano (PUNB) solo en su mecanismo de endurecimiento aplicando catalizador.

Para hacer la mezcla de moldeo, la adición de resina usualmente varía entre 0.7% a 1.5% del peso total de la arena. El catalizador está en función de la cantidad de resina, usualmente se encuentra entre 30% a 50% de la cantidad total de resina. La temperatura óptima de endurecimiento se encuentre entre 20-25°C, pero en la práctica la temperatura de uso se encuentra entre 15-30°C. la temperatura es un factor importante en este sistema de moldeo debido a que, mientras la temperatura disminuye afecta directamente al tiempo de endurecimiento de la mezcla (necesita de mucho más tiempo para endurecerse y no desmoronarse), en cambio una alta temperatura reduce el tiempo de moldeo (tiempo que se tiene para acomodar y compactar la arena sin que se vea afectada su resistencia) debido a que aumenta la razón de endurecimiento, disminuye la fluidez de la arena, e incrementa la emisión de gases tóxicos afectando al trabajador. [6]

Las arenas de sílice no tienen un alto valor de ADV (demanda ácida), ni pH ácido, estas características las hace ideales para su aplicación con resinas furánicas catalizadas por ácido, se recomienda ampliamente que la forma de grano de la arena sea muy semejante a ovalados o globulares, puesto que de esta manera se alcanza elevadas resistencias.

El comportamiento de la resina furánica cuando se polimeriza bajo la influencia de ácidos fuertes. Al inicio toma una coloración verde, a medida que se va endureciendo dicha coloración se vuelve negra. Este color es causado por la formación de sustancias cromofóricas durante las etapas individuales de endurecimiento.

El tipo de ácido usado como catalizador tiene un efecto importante sobre la reutilización de arena y resistencia de la mezcla de moldeo, el uso de ácido fosfórico dificulta la recuperación mecánica debido a que se alcanza alta resistencia, en contraste al usar ácido sulfónico como catalizador se alcanza una resistencia menor facilitando la recuperación

mecánica de la arena. Generalmente el ácido más débil o catalizador más lento, logran valores de resistencia más altos que catalizadores fuertes.

Al tener un tiempo de endurecimiento muy prolongado se debe tener especial cuidado con la humedad y las fuentes de la misma: agua como subproducto de la reacción de polimerización, agua introducida como solvente del catalizador, contenido de humedad en la arena y humedad presente en el aire.

Es importante el control de la humedad debido a que la misma puede disminuir la resistencia, aumentar significativamente el tiempo de endurecimiento o puede detenerlo completamente. [6]

### 1.3.2. Propiedades de la mezcla de moldeo

Para que una mezcla de moldeo en un molde se pueda adaptar, tomar la forma, remover, llenar la cavidad con metal derretido y obtener una pieza fundida de la forma deseada y sin defectos, están involucradas propiedades como: refractariedad, resistencia, permeabilidad, fluidez y moldeabilidad. [26]

#### Refractariedad

Está relacionada directamente con la composición química de la arena base, es la capacidad de soportar altas temperaturas sin llegar al punto de fusión sin que cambie sus propiedades. Al estar relacionada con la composición química la arena base, se considera estable y refractaria cuando su el contenido de sílice ( $SiO_2$ ) sea superior al 99.8%. por debajo de esta concentración o la presencia de óxido de hierro, aluminio, calcio o magnesio la refractariedad empieza a disminuir.

SiO <sub>2</sub> (%)	T. Fusión(°C)
100	1750
99	1650
90	1350

Figura 1.17. Temperatura de fusión de arena de sílice de acuerdo a su pureza.  
(Fuente: [2])

#### Permeabilidad

Se define como la capacidad que tiene la mezcla de moldeo de permitir el paso de gases a través de la misma, posibilitando el escape de gases durante el colado y enfriamiento de la pieza fundida. Se dice que un material presenta alta permeabilidad si deja pasar una cantidad considerable de aire a través de él, en una cantidad de tiempo dado.

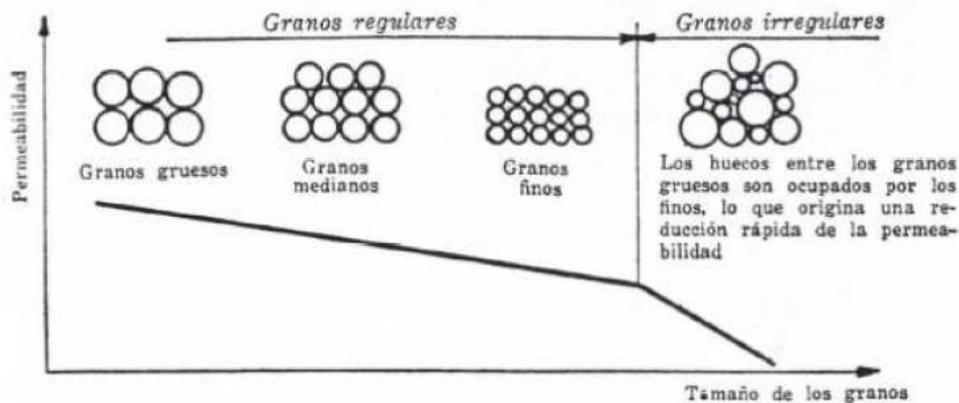


Figura 1.18. Efecto del tamaño de grano sobre la permeabilidad.  
(Fuente: [2])

La permeabilidad es función de varios parámetros: Granulometría, cuanto más finos son los granos tendremos menor permeabilidad; forma de los granos, granos redondeados dan mejor permeabilidad que los granos angulosos; contenido de arcilla, a mayor contenido de arcilla más acoplados y soldados quedarán unos granos con otros y por tanto la permeabilidad será menor; Intensidad del apisonado, la permeabilidad disminuirá con la intensidad del apisonado.[22]

Además, esta propiedad está relacionada con el tamaño y la homogeneidad de granos en la Figura 1.18 se puede apreciar que mientras decrece el tamaño de grano la permeabilidad disminuye hasta el punto en el cual la mezcla de moldeo no permite pasar gases a través de ella. Además, se observa que una arena base mixta que tenga una mezcla de granos pequeños y grandes tiene una permeabilidad baja debido a que los granos pequeños se ubican entre los espacios intersticiales que dejan los granos grandes, obstaculizando el libre paso de gases [2].

### Resistencia

Se define como la capacidad de la mezcla de moldeo de resistir a esfuerzos mecánicos que estará sujeta cuando el metal se vierta dentro de molde y durante su enfriamiento, por lo tanto, el molde debe resistir a esfuerzos de tracción, compresión, resistencia al corte y dureza superficial. La resistencia depende del aglutinante o aglomerante usado, cantidad del aglomerante o aglutinante, aditivos, tamaño, forma, uniformidad de grano, cantidad de polvo fino y contenido de humedad. [9][6]

### Plasticidad

Esta propiedad tiene principal importancia en arenas base que son mezclada con arcilla y agua para formar la mezcla de moldeo. El agua mezclada con la arcilla envuelve a los

granos de arena, dicha capa tiene función de lubricante facilitando el deslizamiento entre partículas. La elevada capacidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula y alta capacidad de hinchamiento. [2]

### **Durabilidad**

Es la medida de la capacidad de la arena de moldeo para repetir el uso sin una pérdida considerable de propiedades mecánicas en orden de ser usada para la fabricación de nuevos moldes.

### **Moldeabilidad o Rugosidad**

Es una característica relacionada con la naturaleza del aglomerante y la finura de la arena. Es la capacidad de la arena de permitir un buen acabado superficial a la vez que tiene facilidad en capturar los detalles del molde

### **Contenido de polvo fino**

El contenido de polvo fino es importante en mezclas de moldeo aglomeradas químicamente debido a que cuando aumenta la cantidad polvo fino, el consumo de aglomerante para obtener una resistencia adecuada se incrementa. [27]

### **1.3.3. Sistema de mezcla de arena base y conjunto resina-catalizador**

La mezcla de moldeo autofraguante obtenida con sistema de moldeo fenólico-uretano (PUNB) o resina furánica (FA), se preparan generalmente en un mezclador de tornillo donde se mueve la arena base mezclándola con el conjunto resina catalizador.

La arena seca se dosifica en un extremo a través de dos o más puertas ajustable que conectan con los silos en los cuales se encuentran 2 tipos de arena: nueva y reciclada. El aglomerante y catalizador liquido se bombean desde tanques de almacenamiento mediante bombas de dosificación; primero se abre la boquilla del catalizador y luego la del aglomerante (resina). Esta forma de adición evita que la resina entre en contacto con altas concentración de catalizador.



Figura 1.19. Mezcladora de tornillo Spartan 400.  
( Fuente: [28])

El uso de un mezclador continuo permite agilizar la elaboración de la mezcla de moldeo con una adición precisa de aglomerantes químicos.

Se debe prestar atención especial al proceso de compactación de arena debido a que debe realizarse antes del inicio de la reacción de polimerización. El proceso de compactación puede ser llevado a cabo por vibración o apisonamiento de la mezcla de moldeo.

Cuando se requiera realizar estudios de las propiedades de la mezcla de moldeo, se puede tomar dicha mezcla directamente de la mezcladora, este proceso no es aplicable para laboratorios puesto que el gran tamaño de la mezcladora imposibilita que pueda ser usada en lugares pequeños, esta y otras razones hacen que existan equipos de pequeñas dimensiones que son básicamente molinos que constan de un tambor que da vueltas sobre su eje, a la vez que tiene una o varias palas giratorias que giran sobre su eje. Dichos equipos son usados para producir cantidades pequeñas de mezcla de moldeo (por debajo de 2 kg) destinada para ensayos de tracción, permeabilidad, etc. Estos equipos son usados principalmente en laboratorio de empresas, universidades, institutos, etc.



Figura 1.20. Mezcladora de laboratorio UTG-130 de 10 litros de capacidad y mezcladora de arena y resina SHY,  
(Fuente: [29][30])

#### **1.3.4. Recuperación de la arena que compone la mezcla moldeo**

La arena base para mezcla de moldeo tiene un alto costo de adquisición y su dificultad de eliminación ha provocado la necesidad de establecer métodos de reutilización. El objetivo de la reutilización es adecuar los granos de arena quemados por el colado de metal líquido a un estado en el cual puedan ser usados nuevamente sin la necesidad de adicionar una cantidad elevada de conjunto resina-catalizador. El proceso de reutilización debe darse de tal manera que las propiedades de la mezcla de moldeo hecha con arena reciclada deben ser las adecuadas para que el proceso de fundición se desarrolle sin novedad.

La recuperación primaria busca que una parte de aglutinante permanezca sin cambios haciendo una contribución para la nueva mezcla de moldeo, esta práctica es muy habitual en técnico de moldeo en verde. La adición de arena nueva y aglutinante en arena reciclada por esta recuperación se la hace para mantener propiedades adecuadas que no afecten el proceso de fundición.

La recuperación secundaria se caracteriza por la recuperación total de la arena base usada para realizar mezclas de moldeo con aglomerantes o aglutinantes, con el fin de usarla después como mezcla con arena nueva o como sustituto total de arena nueva. Este proceso implica la separación del aglomerante o aglutinante que envuelve a los granos de arena y la separación de polvo fino. Las arenas químicamente aglomeradas requieren procesos intensivos para lograr la separación del aglomerante del grano de arena. Este proceso se facilita cuando los aglomerantes usados son de un mismo tipo.

En la industria de la fundición existen 3 tipos de reutilización de arena, estos son:

- Atrición en seco
- Recuperación térmica
- Recuperación húmeda

Cualquiera sea el proceso de reutilización usado una pequeña fracción de la arena base se pierde como polvo fino, ineficiencias en el sistema de arena y vertido de área. La pérdida de arena se considera aceptable cuando se encuentra entre el 5% a 10% del peso total de arena[1].

##### **Atrición en seco**

Este proceso es el más adecuado para la reutilización de mezclas de moldeo aglomeradas químicamente debido al menor costo que este tiene. Los pasos de este proceso son[1]:

- Ruptura de terrones después de sacar la pieza fundida.

- Separación de metales residuales a través de imanes
- Desintegración de arena agrupada en un determinado tamaño y lavado mecánico que elimina aglomerantes
- Eliminación de polvo fino y residuos de aglomerante
- Adición de arena nueva para compensar pérdidas y mantener propiedades.

Además, si bien el proceso de reutilización puede reducir la mezcla de moldeo a simples granos de arena, la eliminación completa del conjunto resina-catalizador que envuelve al grano de arena es imposible por lo que es necesario el control de dicha envoltura con el ensayo conocido como LOI,

### **Recuperación térmica**

Este proceso comprende dos etapas, la primera es el proceso de atrición visto anteriormente y la segunda es llevar a la arena a hornos rotatorios donde se elevará la temperatura a 800°C, a esta temperatura los restos de aglomerantes se queman dejando a los granos de arena sin esta capa. Este proceso tiene un elevado costo debido a que se necesita grandes cantidades de energía para llevarlo a cabo por lo que se usa solo en procesos donde la arena es costosa como arena de sílice fundida o arenas de carbono.

### **Recuperación húmeda**

Al igual que el proceso de recuperación térmica, este proceso tiene dos etapas la primera es la etapa de atrición y la segunda se basa en usar fuertes corrientes de agua, chorros y agitación para remover la película de aglomerantes que envuelven al grano de arena. Culmina con el secado de arena y posterior añadido de arena nueva para compensar pérdidas.

## **1.4. Distribución Weibull**

La distribución de Weibull es un indicador de la variabilidad de la resistencia de materiales resultado de la distribución de defectos de distintos tamaños y distintas cantidades en la estructura del material. Este comportamiento es el resultado de la distribución de defectos de tamaño crítico en varias muestras obtenidas del mismo material.

La distribución de Weibull mostrada en la Figura 1.21. describe tres grupos de muestras de ensayo sometidos a un estrés, fallando a diferente estrés aplicado. A un bajo nivel de estrés, falla una pequeña fracción de probetas con defectos de gran tamaño; a un nivel intermedio de estrés aplicado, los defectos presentes en estas probetas son de menor tamaño que los defectos de las probetas anteriores por lo tanto su resistencia es superior

y a un nivel más alto de estrés aplicado las probetas con mínimo tamaño de defectos estructurales tienen una resistencia superior.

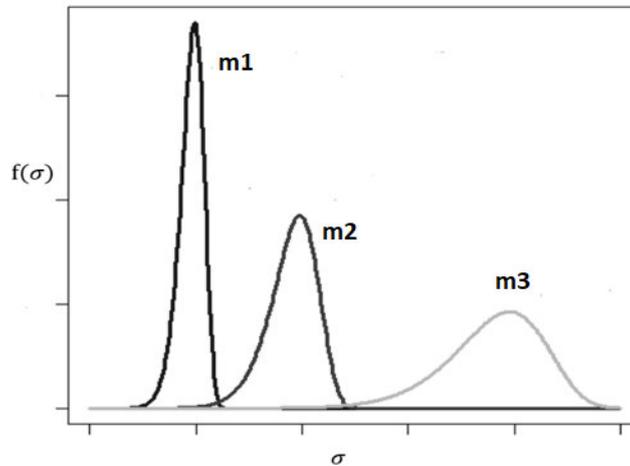


Figura 1.21. Gráfica de Distribución de Weibull de 3 tipos de probetas de tracción con diferente cantidad y tamaño de defectos internos. (Fuente: [31])

El módulo de Weibull varía de acuerdo al material, para aceros al carbono (0,2 %C) tiene valores extremadamente altos. Esto significa que existe poca variación en el valor de la resistencia de diferentes probetas de dicho acero debido a la homogénea distribución de defectos entre probetas del mismo material.

Para cerámicas de alúmina preparadas de forma tradicional la variabilidad de su resistencia es alta con un módulo de Weibull comprendido entre 4 y 7. Para cerámicas preparadas usando mejores procesos tecnológicos su módulo es mayor entre 7 y 9; indicando una mayor uniformidad en la distribución de defectos.

Con la finalidad de obtener el módulo de Weibull se considera un cuerpo de volumen  $V$  con una distribución de defectos y sujeto a un estrés  $\sigma$ . Si se asume que el volumen,  $V$ , está echo con  $n$  elementos de volumen  $V_0$  y cada elemento tiene la misma distribución en el tamaño de sus defectos. Por lo tanto, la probabilidad de supervivencia se define como  $P(V_0)$  y está dada por:

$$P(V_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 1.1.})$$

La probabilidad de falla,  $F(V_0)$ , puede escribirse como:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 1.2.})$$

En la ecuación 1.2.  $\sigma$  es el estrés aplicado,  $\sigma_0$  es el esfuerzo característico (muchas veces se asume igual al esfuerzo promedio),  $\sigma_u$  es el esfuerzo mínimo por debajo del cual la probabilidad de falla es cero. En estas ecuaciones  $m$  es el módulo de Weibull. En teoría el

módulo de Weibull varía entre un rango de 0 a  $\infty$ . Teóricamente un módulo de Weibull igual a 0 mostraría un material que tendría una distribución infinita de defectos internos haciendo que su resistencia varié entre 0 e  $\infty$  (MPa), por otra parte un módulo de Weibull igual a  $\infty$  mostraría un material con una distribución de defectos altamente homogénea haciendo que su resistencia tenga una mínima variación, un ejemplo de módulo de Weibull alto son los metales cuya variación de resistencia es muy baja y rondan alrededor de un solo valor como los metales.

Para metales y aleaciones el módulo de Weibull es  $\approx 100$ . Para cerámicas tradicionales, el módulo de Weibull es menor que 3, cerámicas usadas en ingeniería donde el proceso de fabricación es mejor controlado y por lo tanto el número de defectos es menor, tienen un módulo de Weibull entre 5 a 10.

Cabe destacar que para cerámicos y otros materiales frágiles, se asume  $\sigma_u = 0$ . Esto es debido a que no existe un nivel mínimo de esfuerzo para el cual se pueda decir que un material frágil no fallará. Para materiales frágiles las ecuaciones 1.1. y 1.2. pueden ser reescritas como:

$$P(V_o) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 1.3.})$$

Y

$$F(V_o) = 1 - P(V_o) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Para la ecuación 1.3 , para un esfuerzo aplicado  $\sigma = 0$ , la probabilidad de supervivencia es 1, mientras el esfuerzo aplicado incrementa,  $P(V_o)$  disminuye, aproximándose a cero cuando un valor muy alto de esfuerzo es aplicado. Además, es necesario describir otro significado del parámetro  $\sigma_0$ . En la ecuación 1.4. , cuando  $\sigma = \sigma_0$ , la probabilidad de supervivencia será  $1/e \cong 0.37$ . Por lo tanto,  $\sigma_0$  se convierte en el esfuerzo en el cual la probabilidad de supervivencia es  $\cong 37\%$ . Además, podemos definir que  $\sigma_0$  es el nivel de esfuerzo al cual la probabilidad de falla es  $\cong 0.63$  o  $63\%$ . [13][33][34][31]

En el presente trabajo se asumirá  $\sigma_u = 0$  debido a que se desconoce el esfuerzo mínimo por debajo del cual las probetas de tracción hechas con mezcla de moldeo (conjunto arena-aglomerantes) no fallarán.

## **2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Ensayos de arena y mezcla de moldeo**

Para los ensayos descritos a continuación se consideró 3 tipos de arena de moldeo, además de resinas fenólico uretana y furánica de diferentes marcas, todos los insumos fueron proporcionados por la empresa FUNDIRECICLAR S.A.

#### **2.1.1. Metodología de recolección de muestras de arena para ensayos.**

La AFS en su libro Mold and Core Test Handbook, define el proceso para obtener muestras de arena tanto de fuentes en caída libre como pueden ser los mezcladores de arena y muestras de arena a partir de sacos, así como la reducción en peso de la muestra de arena para satisfacer necesidades de los distintos ensayos a realizar. El procedimiento a seguir es AFS 1104-13-S, en base a este procedimiento se recomienda el peso de muestra de arena para obtener una muestra representativa para cada ensayo a partir de una bolsa que pese más de 50 lb (110 lb), el peso de cada muestra representativa es de 1 a 2 lb (453,59 a 1100,18 g).

#### **2.1.2. Determinación de la distribución del tamaño de la partícula de arena, índice de finura AFS y clasificación de la forma de grano.**

##### **Determinación de la distribución del tamaño de partículas de arena.**

Este método está determinado por el procedimiento AFS 1105-12-S del Libro Mold & Core Test Handbook. Para este procedimiento se debe contar con tamices normalizados ASTM E-11, son un grupo de tamices apilados ordenados por su grosor de malla, del más grueso al más fino, se coloca en ellos una muestra de arena que puede variar entre 45 a 75 g tomada en base al proceso AFS 1104-13-S, se someten a vibración continua por 15 minutos en una tamizadora y finalmente se pesa de forma acumulada el contenido de arena en cada tamiz. El peso final de la arena después de haber pesado todos los tamices no debe variar más de 0,5% el peso inicial de arena

Posteriormente con el peso de cada tamiz se procede a aplicar el procedimiento AFS 1106-12-S para el cálculo del índice de finura AFS. Por facilidad de cálculo es recomendable realizar una hoja de cálculo de Excel.

Peso individual retenido = (Peso acumulado retenido en un tamiz) – (peso acumulado en el tamiz previo)

$$\text{Porcentaje retenido} = \frac{\text{Peso individual retenido}}{\text{Peso total de la muestra de arena}} * 100$$

Tabla 2.1. Ejemplo de cálculo de peso individual y porcentaje retenido en cada tamiz.

Tamaño de Tamiz ASTM E-11	Peso Acumulado Retenido en cada tamiz [g]	Peso Individual retenido en cada tamiz [g]	Porcentaje individual retenido en cada tamiz [%]
6	0	0	0,0%
12	0	0	0,0%
20	0	0	0,0%
30	1,5	1,5	2,0%
40	3,12	1,62	2,2%
50	13,92	10,8	14,4%
70	39,35	25,43	34,0%
100	63,83	24,48	32,7%
140	73,75	9,92	13,3%
200	74,85	1,1	1,5%
270	74,85	0	0,0%
PAN	74,85	0	0,0%
Total	74,85	0	100,0%

(Fuente: [14])

### Índice de Finura AFS

El cálculo de AFS Grain finesses number (AFS GFN) da a conocer una estimación del tamaño medio del tamiz de una muestra de arena, con el cual se conocerá el tamaño aproximado de los granos de arena. En este proceso determinado por el procedimiento AFS 1106-12-S en el cual se usa los porcentajes calculados en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de arena y se multiplica por un factor relacionado al tamaño de malla de cada tamiz. Finalmente, los resultados se suman y se obtiene el número de finura AFS

Tabla 2.2. Ejemplo de cálculo del Índice de Finura AFS.

Tamaño de Tamiz ASTM E-11	Porcentaje retenido	Multiplicador	Producto
6	0,00	0,03	0,00
12	0,00	0,05	0,00
20	0,00	0,10	0,00
30	2,00	0,20	0,40
40	2,16	0,30	0,65
50	14,43	0,40	5,77
70	33,97	0,50	16,99
100	32,71	0,70	22,89
140	13,25	1,00	13,25
200	1,47	1,40	2,06
270	0,00	2,00	0,00
PAN	0,00	3,00	0,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>		<b>62,01</b>
<b>AFS GFN</b>	<b>62,01</b>		

(Fuente: [14])

Al momento de realizar el cálculo del índice de finura es recomendable realizar dicho análisis a 2 muestras de arena del mismo saco y obtener el índice de finura promedio

### Clasificación de la forma de grano.

Este método está definido por el procedimiento AFS 1107-12-S del libro Mold & Core Test Handbook, en este procedimiento se utiliza 10 gr de arena, se ajusta el dispositivo de magnificación de tal manera que se observe una cantidad considerable de granos donde se aprecie la geometría de los mismos, se procede a tomar fotografías y compararlas con la Figura 1.8. del procedimiento antes mencionado o a su vez con la Figura 2.1.

Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

Aptos para fundición

Figura 2.1. Diversas formas de granos de arena de Sílice.  
(Fuente: [35])

### 2.1.3. Contenido de humedad

El contenido de humedad de la arena se determina por la diferencia de peso entre la arena húmeda y la arena después del secado a temperatura entre 93°C a 100°C, el resultado se debe expresar en porcentaje de acuerdo al procedimiento AFS 1125-00-S de Mold & Core Test Handbook.[14][36]

### 2.1.4. pH

La determinación de pH fue realizada en base al procedimiento AFS 5113-00-S en el cual 25 [gr] de arena seca se agregan junto 100 [ml] de agua con pH ajustado a 7. Se agita esta solución durante 5 minutos y se introduce el electrodo que medirá el pH de la arena.

La calibración del equipo debe ser realizada con anterioridad por un miembro calificado del laboratorio.

### **2.1.5. LOI**

Loss on ignition o pérdida por incineración es la medida del cambio de peso de una muestra, consiste en la diferencia de peso medida en porcentaje entre el peso de la muestra de arena previo al ensayo y la muestra de arena incinerada en un horno a 982°C. El resultado es medido en porcentaje.

Este ensayo es un método para determinar el contenido de materia orgánica; la materia orgánica comienza a encenderse a partir de 200°C y se agota completamente a alrededor de 500°; también pueden existir en arenas base minerales de carbonato como calcita (completamente incinerada entre 800°C y 850°C) y dolomita (completamente incinerada entre 700°C y 750°C). Las materias orgánicas en conjunto con minerales de carbonato deben ser estrictamente controlados debido a que su incineración al momento de colar el metal líquido puede producir vapores que producen defectos de fundición. En el caso del ensayo de LOI en arena reciclada además de los minerales y materia orgánica antes mencionada, se incinera residuos de aglomerantes los cuales provienen de moldeos previos. Para evitar defectos de moldeo producido por la producción de gases durante el vertido del metal líquido es necesario tener un control de LOI  $\leq 3\%$  en arena reciclada y LOI  $\leq 1\%$  en arena nueva.[37]

Este ensayo está determinado por el procedimiento AFS 5100-12-S, se debe tomar una muestra de arena que será secada a  $107\text{C}\pm 3^\circ\text{C}$  durante 30 minutos para luego ser enfriada en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente.

Una vez enfriada, en crisoles cerámicos previamente pesados en una balanza de sensibilidad 0.01 g, se añade en cada uno  $8\pm 3$  g de arena en cada uno, en el caso del presente proyecto se añadirá  $10\pm 0.05$  g de arena en cada crisol. Los crisoles con arena se llevarán al horno precalentado a una temperatura de 260°C para luego incrementar gradualmente la temperatura a 982°C en la cual se mantendrá por dos horas, terminado este tiempo se debe sacar los crisoles, ubicarlos en el desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente y medir el peso final de los mismo.

### **2.1.6. Proceso para hacer la mezcla de moldeo destinada a realizar probetas de tracción y permeabilidad.**

Este proceso está guiado por las normas nacionales de la República Popular China (GB/T 2684-2009).

Según la norma GB/T 2684-2009, se debe usar una mezcladora de resina y arena de capacidad entre 1 a 2 kg como la mostrada en la Figura 2.2., una balanza de 0.01 gr de sensibilidad y vasos desechables.



Figura 2.2. Mezcladora de arena y resina SHY del Laboratorio de Metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A.  
(Fuente: [38])

#### **Proceso de mezcla con sistema de moldeo Fenólico-Uretano (PUNB).**

- 1) Registrar temperatura ambiente y humedad relativa.
- 2) Pesar la cantidad adecuada de arena base y aglomerantes (Parte I, Parte II y Parte III) según la disposición del fabricante o elección del usuario.
- 3) Para cantidades muy bajas de Parte III en función de la Parte I, se recomienda mezclar en otro recipiente una cantidad considerable de Parte I para que la Parte III tenga cantidades manejables.
- 4) En caso de haber mezclado previamente la Parte I con Parte III, ignorar el paso 5 y 6, mezclar la combinación Parte I-Parte III con la arena base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 5) Mezclar Parte III con la arena base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 6) Mezclar Parte I con la arena base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 7) Mezclar la Parte II con la mezcla Parte III-Parte I-Arena Base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 8) Sacar la mezcla de moldeo y proceder a colocarla en los moldes de acuerdo a la necesidad del usuario.

#### **Proceso de mezcla con resina furánica (FA)**

- 1) Registrar temperatura ambiente y humedad relativa.

- 2) Pesar la cantidad adecuada de arena base y aglomerantes (resina y catalizador) según la disposición del fabricante o elección del usuario.
- 3) Mezclar el catalizador con la arena base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 4) Mezclar la resina con la mezcla catalizador-arena base durante un intervalo de tiempo determinado por el usuario.
- 5) Sacar la mezcla de moldeo y proceder a colocarla en los moldes de acuerdo a la necesidad del usuario.

### 2.1.7. Resistencia a la tracción

En el ensayo de resistencia a la tracción se somete a un material con forma normalizada a una fuerza de tracción, es decir, se aplica una o varias fuerzas que tratan de estirar al material. En este ensayo se estira el material hasta llegar a su rotura.

En el caso del ensayo de resistencia a la tracción realizado en el presente proyecto esta guiado con la norma GB/T 2684-2009.

Según la norma GB/ T2684-2009 se usa un equipo de compactación estandarizado mostrado en la Figura 2.3 que consta de 6 contrapesos de 800 g. Además, consta de 3 placas metálicas con la forma de la probeta y un cuadro metálico que servirá de guía y mantendrá las placas en su lugar; de las 3 placas metálicas: la placa inferior es quien albergará la probeta de ensayo, la placa del medio tiene la función de ser guía de las cuchillas que quitaran el exceso de arena recién compactada de la placa inferior y junto con la placa superior son guías de los contrapesos. Con la ayuda de un volante con manija se eleva el conjunto cuadro-placas-contrapesos y se deja caer de 3 a 5 veces. Para el propósito de este proyecto, se dejará caer 4 veces el conjunto antes mencionado. Las dimensiones de las probetas de tracción obtenidas se muestran en la Figura 2.4.



Figura 2.3. Máquina para fabricar probetas de mezclas de moldeo.  
(Fuente:[39])

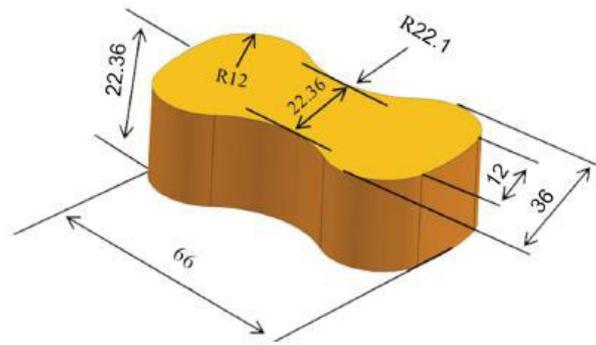


Figura 2.4. Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción.  
(Fuente: [40])

Una vez obtenidas las probetas se dejará polimerizar a temperatura ambiente durante 2 y 4 horas (tiempos de polimerización definido para este proyecto), una vez cumplido dicho tiempo se procederá romper las probetas en el equipo de prueba de resistencia de arena mostrado en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Equipo de prueba de resistencia a la arena SWY.  
(Fuente: [41])

### 2.1.8. Permeabilidad

Según las norma GB/T 2684-2009 se debe usar un equipo como el mostrado en la Figura 2.3., se usa el mismo equipo usado para la fabricación de probetas de tracción, la únicas diferencias son: sus contrapesos son cilíndricos de 1250 g cada uno y solo se compone de 2 placas de aluminio que tienen la forma de las probetas de permeabilidad (a diferencia de las 3 placas de las probetas de tracción); la placa inferior tiene la función de albergar las probetas de permeabilidad y la placa superior es la guía de las cuchillas que retiran el exceso de arena además de servir como guías para los contrapesos cilíndricos. Con la ayuda de un volante con manija se eleva el conjunto cuadro-placas-contrapesos y se deja caer de 3 a 5 veces. Para el propósito de este proyecto, se dejará caer 4 veces el conjunto antes mencionado. Las dimensiones de las probetas de permeabilidad obtenidos se muestran en la Figura 2.6.

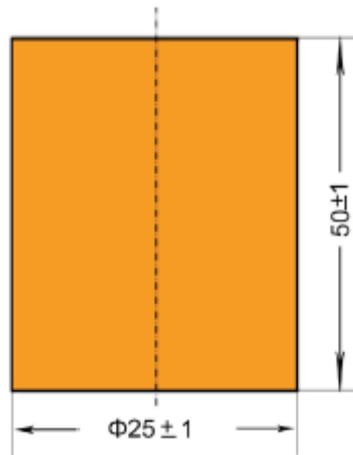


Figura 2.6. Dimensiones de la probeta para ensayos de permeabilidad.  
(Fuente: [40])

Una vez obtenidas las probetas se dejará polimerizar a temperatura ambiente durante 2, 4 y 24 horas (tiempos de polimerización definido para este proyecto), una vez cumplido dicho tiempo se procederá a realizar el ensayo de permeabilidad con el equipo mostrado en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Medidor de Permeabilidad.  
(Fuente: [42])

### 2.1.9. Rugosidad

El ensayo de rugosidad se realizó en el laboratorio de Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional donde se enviaron las probetas de permeabilidad de cada mezcla de moldeo (15 en total) para medir su rugosidad, el equipo usado fue un rugosímetro Elcometer 224/2 con sonda tipo P1.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de los distintos ensayos realizados a las diferentes arenas base y mezclas de moldeo aglomeradas químicamente.

Posteriormente se discute y analiza los resultados de dichos ensayos para determinar las características y propiedades de los distintos tipos de arenas base y mezclas de moldeo aglomeradas químicamente.

#### 3.1. Análisis de características y propiedades de la arena base

Se procederá a analizar los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio de Metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A. a las siguientes arenas base:

- Arena de Sílice, proveedor Sierra Central
- Arena de Sílice, proveedor Sibelco
- Cast Ball (Corindón), proveedor Mineração Curimbaba

Todas las arenas base y aglomerantes químicos fueron proporcionados por la empresa FUNDIRECICLAR S.A. Además, los ensayos de distribución, tamaño y forma de grano, contenido de humedad, pH, LOI, resistencia a la tracción y permeabilidad fueron realizados en el Laboratorio de metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A.

##### 3.1.1. Distribución, tamaño y forma de grano.

Siguiendo los procedimientos mencionados en el Capítulo 2, se hizo ensayos para las 3 arenas bases previamente mencionadas, por cada una se tomó dos muestras para la determinación de la distribución del tamaño de granos de arena y cálculo del Índice de AFS promedio. Además, se realiza un histograma en orden de determinar los tamices con mayor concentración de arena base.

##### Corindón Cast Ball

Tabla 3.1. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino.

<b>Resultados</b>					
<b>Índice AFS m1</b>	<b>Índice AFS m2</b>	<b>Índice de Finura (AFS) Promedio</b>	<b>Tipo de arena</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>% Polvo Fino</b>
51,68	51,23	51,46	Media	0,25 - 0,5	1,94

(Fuente: Propia)

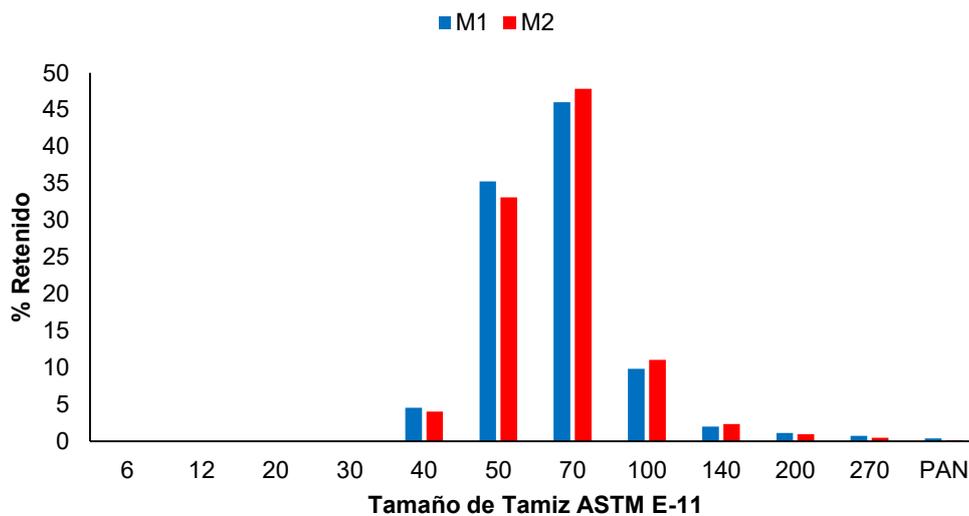


Figura 3.1. Distribución granulométrica de Cast Ball  
(Fuente: Propia)

### Arena de sílice Sierra Central

Tabla 3.2. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino.

Resultados					
Índice AFS m1	Índice AFS m2	Índice de Finura (AFS) Promedio	Tipo de arena	Tamaño (mm)	% Polvo Fino
39,84	39,42	39,63	Media	0,25 - 0,5	0,34

(Fuente: Propia)

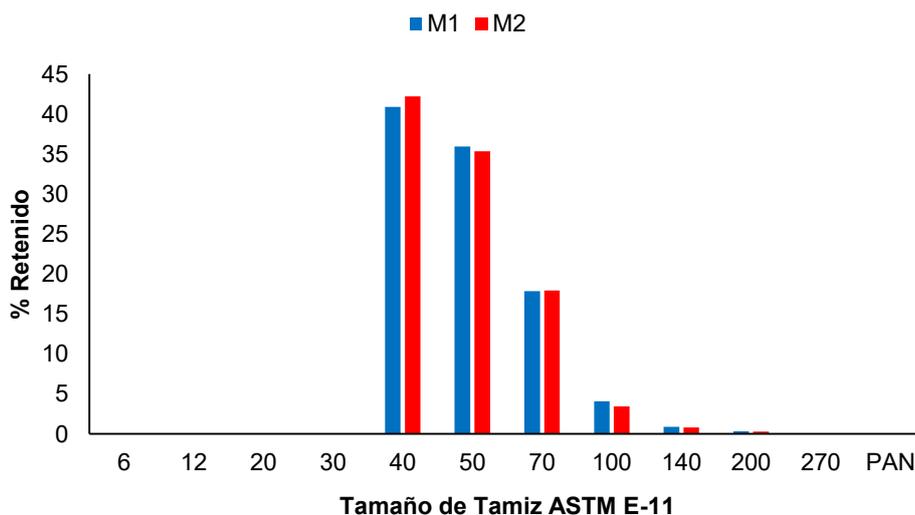


Figura 3.2. Distribución granulométrica de arena de sílice Sierra Central.  
(Fuente: Propia)

## Arena de sílice Sibelco

Tabla 3.3. Índice AFS, tipo de arena, tamaño promedio de la arena y porcentaje de polvo fino.

Resultados					
Índice AFS m1	Índice AFS m2	Índice de Finura (AFS) Promedio	Tipo de arena	Tamaño (mm)	% Polvo Fino
62,05	60,95	61,50	Media	0,25 - 0,5	2,12

(Fuente: Propia)

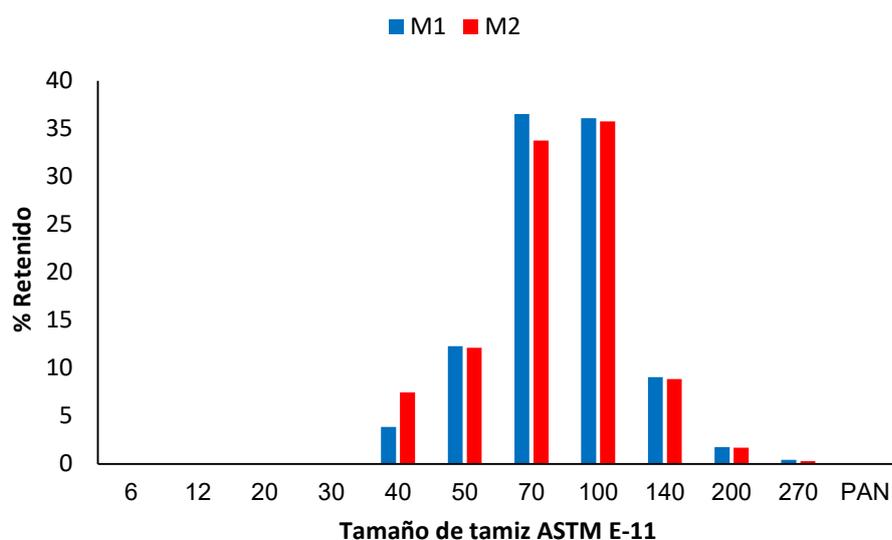


Figura 3.3. Distribución granulométrica de arena de sílice Sibelco.

(Fuente: Propia)

A realizar la granulometría de corindón Cast Ball y arenas de sílice Sibelco y Sierra Central, calcular el índice AFS y compararlas con sus respectivas fichas técnicas. Se llegó a la conclusión de que corindón Cast Ball y arena de sílice Sibelco cumplen con las especificaciones de sus respectivas hojas técnica, en el caso de arena de sílice Sibelco se obtuvo un índice AFS promedio de 61,50 (ficha técnica AFS 59, >56 y <64), arena de sílice Sierra Central se obtuvo un índice AFS promedio de 39,63 (ficha técnica entre 40 y 50) y corindón Cast Ball con un índice AFS de 51,46 (Ficha técnica AFS 50), en todos los casos el índice es muy cercano o está dentro de los valores permitidos de su variación, por lo tanto el corindón y las arena de sílice disponibles cumplen con lo establecido por sus fichas técnicas y son aptas para su aplicación en la fabricación de moldes de arena.

Por otra parte, catalogadas por el índice AFS calculado, corindón Cast Ball y arenas de sílice Sibelco y Sierra Central tienen tamaño medio por su índice AFS comprendido entre 35 y 60, con un tamaño de grano comprendido entre 0,25-0,5 [mm]. Otro factor a tomar en cuenta es la cantidad retenida en los 3 últimos tamices (incluido el PAN) puesto que la arena retenida en los mismos se denomina como “Polvo Fino” y se mide en porcentaje de

arena, es importante el control de polvo fino debido a que su presencia en grandes cantidades disminuye la resistencia de la mezcla de moldeo, aumenta el consumo de aglomerantes para lograr una buena resistencia, tiempo de polimerización adecuado y disminuye la permeabilidad. Se recomienda una cantidad de polvo fino menor a 1% [22][6][40][23]. En el caso de corindón Cast Ball (1,94% de polvo fino), arenas de sílice Sibelco (2,12% de polvo fino) y Sierra Central (0,34% de polvo fino); la arena de sílice Sierra Central es la única que está dentro del parámetro de polvo fino. El efecto negativo de la cantidad de polvo fino es que disminuye la resistencia, se debe aumentar la cantidad de resina o catalizador para obtener una resistencia o tiempo de polimerización adecuado. [43][6][9]

Por otra parte, el número de finura AFS es solo una rápida referencia para describir el tamaño medio de las partículas de una muestra de arena dada, no tiene demasiado sentido en sí mismo ya que se puede obtener el mismo número de finura AFS y en consecuencia el mismo tamaño medio de grano con distribuciones de granos totalmente diferentes. Se optó por realizar histogramas con los porcentajes de arena retenida en cada tamiz para tener una mejor idea de su homogeneidad y distribución. En el caso de corindón Cast Ball los granos se distribuyen en su mayoría en los tamices 50 y 70 con 35,29% y 46,04% (muestra 1), 33,10% y 47,86% (muestra 2) de arena retenida respectivamente. Con arena de sílice Sierra Central un alto porcentaje de arena retenida está en las mallas 40 y 50 con 40,89% y 35,94% (muestra 1), 42,20% y 35,33% (muestra 2) de arena retenida respectivamente. Por otra parte, con arena de sílice Sibelco se tiene que los granos se distribuyen en su mayoría en los tamices 70 y 100 con 36,52% y 36,08% (muestra 1), 33,76% y 35,75% (muestra 2) de arena retenida respectivamente.

En consecuencia, el porcentaje retenido de granos de arena en dos tamices se tiene: corindón Cast Ball 81,33% en la muestra 1 y 90,96% en la muestra 2; arena de sílice Sierra Central 76,83% en la muestra 1 y 77,53% en la muestra 2; arena de sílice Sibelco 72,6% en la muestra 1 y 69,51% en la muestra 2.

Se recomienda un porcentaje de arena retenida en dos tamices de mínimo 70% para obtener una mezcla de moldeo con buenas propiedades [7][43][9]

### **3.1.2. Clasificación de la forma de grano**

Este ensayo se lo realizó bajo el procedimiento AFS 1107-12-S del libro *Mold & Core Test Handbook*, se utilizó un microscopio estéreo de 20X modelo MEIJI EMZ-13TR con cámara integrada del Laboratorio de Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional. Se

incluyó una escala en la parte inferior derecha, la escala está incluida en el aumento 20x por defecto.



Figura 3.4. Corindón Cast Ball, aumento de 20X.  
(Fuente: Propia)



Figura 3.5. Arena de sílice Sierra Central, aumento 20X.  
(Fuente: Propia)



Figura 3.6. Arena de sílice Sibelco, aumento 20X.  
(Fuente: Propia)

Las figuras mostradas previamente muestran con un aumento de 20x a las arenas base, estas figuras se compararon con las incluidas en el procedimiento AFS 1107-12-S del libro Mold & Core Test Handbook. La Figura 3.4. se muestra que corindón Cast Ball tiene forma redonda similar a la mostrada en la Figura 1.8. literal 1.8(b). Por otra parte, las Figuras 3.5. y 3.6. muestran la arena de sílice Sierra Central y arena de sílice Sibelco respectivamente, en ambos casos se aprecia que tiene forma subangular como la mostrada en la Figura 1.8. literal 1.8(d).

Conocer la forma de los granos de arena es muy importante debido a que formas de grano regulares favorecen el bajo consumo de aglomerante para formar una capa homogénea alrededor del grano de arena, logrando de esta manera una buena unión entre granos de arena y con ella una buena resistencia. Por lo tanto. Para una misma cantidad de aglomerante se obtiene una mejor resistencia con granos regulares que con granos irregulares. [6][22][33][9]

### 3.1.3. Contenido de humedad

Este ensayo está definido por el procedimiento AFS 1125-00-S de Mold & Core Test Handbook, el procedimiento no define la cantidad de muestras de arena ni el peso que se debe usar, se decidió a usar 3 muestras de cada arena base de  $25 \pm 1$  g cada una y se procedió a secar a temperatura de  $98^{\circ}\text{C}$  durante 30 min.

Las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 muestran el contenido de humedad de 3 muestras individuales de cada arena base y su promedio. Para una correcta activación de aglomerantes se recomienda que la arena base tenga un contenido de humedad menor a 0.2%. En el caso de las arenas base ensayadas, el contenido de humedad de estas; se encuentra por debajo de dicho porcentaje haciéndolas aptas para el moldeo con aglomerantes químicos.

Una mezcla de moldeo hecha con arena base que tiene un alto contenido de humedad puede retardar o detener completamente el curado, entendiéndose como curado el endurecimiento de la mezcla (reacción de polimerización), en caso de endurecerse la mezcla de moldeo puede resultar con una baja resistencia.[43][6][9]

Tabla 3.4. Contenido de humedad de corindón Cast Ball.

<b>Peso del crisol vacío (g)</b>	<b>Peso del crisol lleno (g)</b>	<b>Peso del crisol después del secado (g)</b>	<b>Contenido de humedad (%)</b>
24,49	49,49	49,49	0,00%
25,25	50,45	50,44	0,02%
25,46	50,78	50,78	0,00%
<b>Promedio</b>			0,01%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.5. Contenido de húmeda de arena de sílice Sierra Central.

Peso del crisol vacío (g)	Peso del crisol lleno (g)	Peso del crisol después del secado (g)	Contenido de humedad (%)
24,49	49,61	49,6	0,02%
25,25	50,25	50,24	0,02%
25,46	50,64	50,63	0,02%
<b>Promedio</b>			0,02%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Contenido de humedad de arena de sílice Sibelco.

Peso del crisol vacío (g)	Peso del crisol lleno (g)	Peso del crisol después del secado (g)	Contenido de humedad (%)
24,49	49,51	49,48	0,06%
25,25	50,31	50,29	0,04%
25,46	50,48	50,46	0,04%
<b>Promedio</b>			0,05%

(Fuente: Propia)

### 3.1.4. pH

El ensayo de pH se realizó de acuerdo a las directrices mostradas en el apartado 2.1.4. del capítulo 2. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 3.7. y en base a la Figura 3.7 se define si la arena base ensayada es alcalina, neutra o ácida.

Tabla 3.7. pH de arena de sílice y corindón.

Arena base	pH
Arena de sílice Sierra Central	7,15
Arena de sílice Sibelco	7,08
Corindón Cast Ball	6,84

(Fuente: Propia)

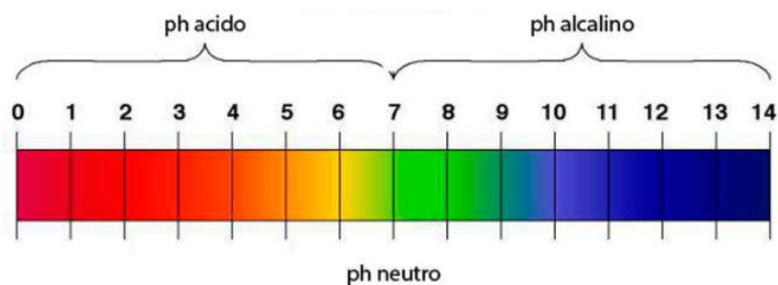


Figura 3.7. Escala de pH.

Fuente: [44]

La Tabla 3.7 da a conocer el valor de pH de las arenas de moldeo usadas para el desarrollo de este proyecto y la Figura 3.7. muestra la escala de pH cuando este es ácido o alcalino. De acuerdo a los resultados mostrados previamente se tiene que la arena de sílice Sierra Central es ligeramente alcalina, arena de sílice Sibelco tiene un pH neutro y corindón Cast Ball tiende a ser ácida.

De acuerdo a Valdez. D, el conocer el pH o ADV (demanda ácida) de una arena base facilita la elección del catalizador. Puesto que una arena con alto pH o ADV al usar resina furánica (FA) puede tener un efecto adverso sobre el tiempo de endurecimiento (curado) debido a que una arena altamente alcalina puede neutralizar el catalizador ácido, ralentizando el endurecimiento o deteniéndolo completamente. Por otra parte, una arena ácida promueve el endurecimiento por lo que se necesita cantidades menores de catalizador o a su vez usar catalizadores de cura lenta. Los catalizadores de cura lenta se caracterizan por tener una menor concentración de ácido o aminas que hace que la cura o endurecimiento sea lento. [1][6][43]

Para las arenas de moldeo del presente proyecto con sistema de moldeo PUNB (resina fenólico-uretano) se usará catalizadores de cura rápida para las arenas de sílice Sibelco y Sierra Central debido a que son arenas ligeramente alcalinas y neutra respectivamente. En contraste, para corindón Cast Ball que es ácido se usará catalizadores de cura lenta.

Además, al usar el sistema de moldeo FA (resina furánica) se trabajará con 35% de catalizador en función de la cantidad de resina para todas las arenas base, esta cantidad se usará por recomendación de directivos de la empresa FUNDIRECICLAR S.A.

### **3.1.5. LOI**

En base al apartado 2.1.5 del Capítulo 2 se realizó el ensayo de LOI a diferentes muestras de arenas base usadas para el presente estudio, el resultado de dichos ensayos se presenta en las siguientes tablas.

Las tablas 3.8, 3.9 y 3.10, muestran los resultados de LOI de corindón Cast Ball, Arena de sílice Sierra Central y Sibelco. Corindón Cast Ball 0.03%, arena de sílice Sierra Central 0,20% y arena de sílice Sibelco 0,55%.

Por lo tanto, la aplicación de cualquiera de las arenas base antes mencionadas en la fabricación de moldes de arena, no presentará cantidades considerables de vapores durante el colado de metal líquido evitando defectos superficiales o internos (poros) debido a que en todos los casos se aprecia que el porcentaje de LOI se encuentra por debajo del máximo recomendado para arena base nueva, menor a 1% [6][37][27].

Tabla 3.8. Resultados de LOI de corindón Cast Ball

<b>Nro. Crisol</b>	<b>Peso crisol vacío[g]</b>	<b>Peso crisol lleno inicial [g]</b>	<b>Peso crisol lleno final [g]</b>	<b>%LOI</b>
1	25,51	35,52	35,52	0,00
2	25,1	35,1	35,1	0,00
3	24,39	34,4	34,39	0,10
<b>Promedio</b>				0,03

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Resultados de arena de sílice Sierra Central

<b>Nro. Crisol</b>	<b>Peso crisol vacío[g]</b>	<b>Peso crisol lleno inicial [g]</b>	<b>Peso crisol lleno final [g]</b>	<b>%LOI</b>
1	24,47	34,58	34,55	0,30
2	25,44	35,53	35,51	0,20
3	25,23	35,31	35,3	0,10
<b>Promedio</b>				0,20

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Resultados de arena de sílice Sibelco

<b>Nro. Crisol</b>	<b>Peso crisol vacío[g]</b>	<b>Peso crisol lleno inicial [g]</b>	<b>Peso crisol lleno final [g]</b>	<b>%LOI</b>
1	25,51	35,7	35,65	0,49
2	25,11	35,16	35,11	0,50
3	24,41	35,03	34,96	0,66
<b>Promedio</b>				0,55

(Fuente: Propia)

## 3.2. Análisis de las características y propiedades de la mezcla de moldeo

### 3.2.1. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull

#### Proporciones de arena base y aglomerantes.

Con la información mostrada en el Capítulo 2 se realizó la mezcla de moldeo (conjunto arena-aglomerantes) y el ensayo de resistencia a la tracción en el Laboratorio de Metales y Arenas de la Empresa FUNDIRECICLAR S.A.

A continuación, en la Tabla 3.11 se presenta la cantidad, tipo y marca de aglomerantes usados en la elaboración de mezclas de moldeo con diferentes arenas base. Cabe recalcar que para la realización de probetas de tracción se usó 800 g de arena base mientras que para la elaboración de probetas de permeabilidad se usó 1000 g de arena base.

Tabla 3.11. Mezclas de moldeo para ensayos de tracción y permeabilidad.

Sistema de aglomerantes	Marca de aglomerantes	Marca de Arena	Cantidad de aglomerantes en porcentaje de arena
PUNB (resina fenólico-uretano)	SQ	Arena de sílice Sierra Central	1%
			1,40%
	SQ	Arena de sílice Sibelco	1%
			1,40%
	SQ	Corindón Cast Ball	1%
			1,40%
Mancuso	Arena de sílice Sierra Central	1%	
Mancuso	Arena de sílice Sibelco	1%	
Mancuso	Corindón Cast Ball	1%	
FA (resina furánica)	SQ	Arena de sílice Sierra Central	1%
			1,40%
	SQ	Arena de sílice Sibelco	1%
			1,40%
	SQ	Corindón Cast Ball	1%
		1,40%	

(Fuente: Propia)

Las tablas 3.12 a 3.16 muestran la denominación comercial y cantidad de aglomerantes usados para la elaboración de mezclas de moldeo con resina fenólico-uretano o sistema de moldeo PUNB y las tablas 3.17 a 3.19 en cambio muestran para la elaboración de mezclas de moldeo con resina furánica o sistema de moldeo FA.

Tabla 3.12. Aglomerantes PUNB y arenas base para elaboración de mezcla de moldeo

Marca de Aglomerantes	Arena Base	Aglomerantes PUNB		
		Parte I	Parte III	Parte III
Mancuso	Corindón Cast Ball	Resina Rapidur A733	Resina Rapidur B727	Catalizador Medio C3 400
	Arena de sílice Sierra Central			Catalizador Rápido C 550
	Arena de sílice Sibelco			Catalizador Rápido C 550
ShengQuan	Corindón Cast Ball	Resina SQ 101 HB	Resina SQ 102 HB	Catalizador Lento NP 103E
	Arena de sílice Sierra Central			Catalizador Rápido NP 103
	Arena de sílice Sibelco			Catalizador Rápido NP 103

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco al 1% de aglomerante.

Sistema de Moldeo PUNB	Arena Base	% de resina en base a arena (Parte I + Parte II + Parte III)	Parte I	Parte II	Parte III
			% en base a resina total		% en base a Parte I
		1%	55%	45%	5%
Cantidad (g)	800	8	4,40	3,60	0,22
	1000	10	5,50	4,50	0,28

(Fuente: Propia)

Tabla 3.14. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad para arena con sílice Sibelco al 1,4% de aglomerante.

Sistema de Moldeo PUNB	Arena Base	% de resina en base a arena (Parte I + Parte II + Parte III)	Parte I	Parte II	Parte III
			% en base a resina total		% en base a Parte I
		1,4%	50%	50%	5%
Cantidad (g)	800	11,2	5,60	5,60	0,28
	1000	14	7,00	7,00	0,35

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sierra Central o corindón Cast Ball al 1% de aglomerante

Sistema de Moldeo PUNB	Arena Base	% de resina en base a arena (Parte I + Parte II + Parte III)	Parte I	Parte II	Parte III
			% en base a resina total		% en base a Parte I
		1%	55%	45%	1%
Cantidad (g)	800	8	4,40	3,60	0,04
	1000	10	5,50	4,50	0,06

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Cantidad de aglomerantes PUNB en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sierra Central o corindón Cast Ball al 1,4% de aglomerante.

Sistema de Moldeo PUNB	Arena Base	% de resina en base a arena (Parte I + Parte II + Parte III)	Parte I	Parte II	Parte III
			% en base a resina total		% en base a Parte I
		1,4%	50%	50%	1%
Cantidad (g)	800	11,2	5,60	5,60	0,06
	1000	14	7,00	7,00	0,07

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Aglomerantes FA y arenas base para elaboración de mezcla de moldeo

Marca de Aglomerantes	Arena Base	Aglomerantes FA	
		Resina	Catalizador
ShengQuan	Cast Ball	SQM 305A	GS03
	Sierra Central		
	Sibelco		

(Fuente: Propia)

Tabla 3.18. Cantidad de aglomerantes FA en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco, Sierra Central o corindón Cast Ball al 1% de aglomerante.

Sistema de Moldeo FA	Arena Base	% de resina en base a arena	% de catalizador en base a resina
		1%	35%
Cantidad (g)	800	8	2,80
	1000	10	3,50

(Fuente: Propia)

Tabla 3.19. Cantidad de aglomerantes FA en porcentaje y peso de cada uno para la elaboración de probetas de tracción y permeabilidad con arena de sílice Sibelco, Sierra Central y corindón Cast Ball al 1,4% de aglomerante.

Sistema de Moldeo FA	Arena Base	% de resina en base a arena	% de catalizador en base a resina
		1,4%	35%
Cantidad (g)	800	11,2	3,92
	1000	14	4,90

(Fuente: Propia)

Se analizaron 15 mezclas de moldeo, se varió arena base, sistema de moldeo, marca y cantidad de aglomerantes. Las mezclas de moldeo a analizar están mostradas en la Tabla 3.11. Los aglomerantes usados en el sistema de moldeo PUNB (resina fenólico-uretano) están mostrados en la Tabla 3.12. En dicha tabla se aprecia una notable diferencia en la parte III de los aglomerantes PUNB. Debido a que corindón Cast Ball tiene un pH de 6,84 (ácida) al utilizar un catalizador rápido, el efecto de éste sobre corindón Cast Ball es sobre la reacción de curado o reacción de polimerización, la reacción de polimerización es tan rápida que no permite la fabricación de probetas de tracción o permeabilidad. Por lo tanto, para corindón Cast Ball se debió cambiar la Parte III, catalizador rápido por un catalizador medio en el caso de aglomerantes Mancuso y catalizador lento en el caso de aglomerantes ShengQuan, ambos del sistema de moldeo PUNB (fenólico-uretano), para obtener un tiempo de moldeo aceptable que permita elaborar probetas de tracción y permeabilidad.

Como se había indicado anteriormente la cantidad de polvo fino puede influir negativamente disminuyendo la resistencia para una determinada cantidad de aglomerante o aumentar la cantidad de catalizador para conseguir un tiempo de polimerización adecuado (endurecimiento del espécimen). Se aprecia en la Tabla 3.14 que la arena de sílice Sibelco (2,12% de polvo fino) se necesita 5 veces más Parte III (amina como catalizador) que con arena de sílice Sierra Central o Corindón Cast Ball para lograr un tiempo de desmoldeo adecuado (5 a 15 min) puesto que el sistema de moldeo PUNB se caracteriza por su rápido tiempo de desmoldeo, con 1% a 3% de Parte III el tiempo de desmoldeo se encontraba en 5 a 24 horas, demasiado excesivo no aplicable para ningún proceso de fundición y con 4% el tiempo de desmoldeo redujo a entre 2 a 3 horas, por lo que finalmente se optó por usar 5% de catalizador para obtener un tiempo de desmoldeo adecuado dentro del rango anteriormente mencionado (5 a 15 min).

En el caso de corindón Cast Ball (1,94% de polvo fino) no tuvo el efecto negativo de la arena de sílice Sibelco y aglomerantes PUNB a pesar de su alto porcentaje de polvo fino, esto se debe a que el corindón Cast Ball es ligeramente ácido (pH=6,84) esta acidez

favorece la polimerización, es por dicha razón que no se puede utilizar catalizadores rápidos o de alta concentración ácida, puesto que este ambiente ácido daría lugar a una polimerización sumamente rápida que no permitiría fabricar probetas de tracción o permeabilidad, por tal razón se usa un catalizador de cura lenta para conseguir un tiempo de moldeo aceptable.

Con arena de sílice Sierra central (0,34% de polvo fino) no se tuvo ningún problema al realizar probetas de tracción y permeabilidad con sistema PUNB.

Usando el sistema de moldeo FA (resina furánica) no se obtuvo ningún inconveniente al momento de elaborar probetas de tracción y permeabilidad con los aglomerantes usados para dicho sistema.

### Ajuste a distribución Weibull

Con el fin de conocer la cantidad adecuada de datos para tener un buen conocimiento de la resistencia a la tracción de cada mezcla de moldeo, se utilizó el coeficiente de variación  $\delta$ , igual a la desviación estándar  $\sigma$  dividida por la media  $\mu$ .

Para el cálculo del coeficiente de variación se utilizó los datos de resistencia de la primera mezcla de moldeo realizada (Arena Sibelco, Aglomerantes Mancuso PUNB), obteniendo este resultado con 6, 12, 18, 20, 22 y 24 datos mostrados en la tabla 3.20. Además, se calculó el coeficiente de variación con 20 datos excluyendo 2 datos mínimos y 2 datos máximos de resistencia como se muestra en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Media, desviación estándar y coeficiente de variación para distintas cantidades de probetas ensayadas.

<b>Cantidad de probetas ensayadas</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>24</b>
<b>Desviación estándar</b>	0,0235	0,0342	0,0323	0,0343	0,0337	0,0343
<b>Media</b>	0,3050	0,3258	0,3272	0,3290	0,3268	0,3233
<b>Coeficiente de variación</b>	7,69%	10,51%	9,88%	10,43%	10,32%	10,62%

(Fuente: Propia)

Se aprecia que, a partir de los 20 datos el coeficiente de variación tiene tendencia a estabilizarse, según Félix Chen se considera un coeficiente de variación excelente cuando es menor al 5% y aceptable cuando su valor se encuentra entre 5% y 15%, en caso de ser mayor a 15% se debe identificar posibles causas externas de variación. Además, se

considera una cantidad aceptable de datos cuando el coeficiente de variación empieza a mostrar tendencia de estabilizarse alrededor de un solo valor [45]. Por lo tanto, se usará 20 datos de resistencia para el cálculo de módulo de Weibull y obtención de la distribución del Weibull. Debido a que el equipo de elaboración de probetas solo permite hacer tandas de 6 probetas cada una, se realizará 24 probetas de cada mezcla de moldeo y se quitará el valor de resistencia de 4 probetas, 2 valores máximos y 2 valores mínimos.

Se aprecia en la Tabla 3.21. que el valor del coeficiente de variación calculado utilizando 20 datos de resistencia previamente excluidos 2 valores mínimos y 2 valores máximos de resistencia (24 datos en total) está dentro del rango aceptable mencionado anteriormente.

Por lo tanto, para todas las mezclas de moldeo se realizarán 24 probetas y se excluirán 4, 2 de más alta resistencia y 2 de más baja resistencia.

Tabla 3.21. Media, desviación estándar y coeficiente de variación para 20 probetas ensayadas.

<b>Cantidad de probetas</b>	<b>20, previamente excluido 2 datos mínimos y 2 máximos</b>
<b>Desviación estándar</b>	0,0266
<b>Media</b>	0,3215
<b>Coeficiente de variación</b>	8,28%

(Fuente: Propia)

En lo que respecta a la elaboración de probetas de tracción como se había indicado previamente se realizaron 24 probetas de tracción una vez ensayados se excluyeron los 2 valores máximos y 2 valores mínimos de resistencia. Las Tablas 3.22 y 3.23, muestran la media, desviación estándar y coeficiente de variación para 2 tiempos de polimerización (2 y 4 horas) de cada una de las mezclas de moldeo a analizar. Se aprecia en dichas tablas que los datos obtenidos al ensayar las probetas de tracción de cada mezcla tienen un coeficiente de variación menor a 15%, dando a conocer que los datos tienen una baja variación haciéndolos ideales para ser usados en otros análisis

Tabla 3.22. Coeficiente de variación para mezclas de moldeo realizadas con sistema de moldeo PUNB (fenólico uretano)

Sistema de moldeo	Marca de aglomerantes	Arena	Cantidad de aglomerantes en porcentaje de arena	Tiempo de polimerización	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación
PUNB	SQ	Sílice, Sierra Central	1%	2	0,275	0,0164	5,97%
				4	0,335	0,0338	10,09%
			1,40%	2	0,390	0,0311	7,98%
				4	0,495	0,0347	7,01%
	SQ	Sílice, Sibelco	1%	2	0,179	0,0129	7,23%
				4	0,320	0,0195	6,08%
			1,40%	2	0,305	0,0206	6,77%
				4	0,422	0,0427	10,13%
	SQ	Corindón, Cast Ball	1%	2	0,243	0,0092	3,80%
				4	0,307	0,0230	7,51%
			1,40%	2	0,302	0,0193	6,39%
				4	0,426	0,0239	5,63%
	Mancuso	Sílice, Sierra Central	1%	2	0,210	0,0209	9,97%
				4	0,295	0,0330	11,21%
	Mancuso	Sílice, Sibelco	1%	2	0,322	0,0266	8,28%
				4	0,331	0,0251	7,59%
	Mancuso	Corindón, Cast Ball	1%	2	0,300	0,0303	10,09%
				4	0,343	0,0218	6,35%

(Fuente: Propia)

Tabla 3.23. Coeficiente de variación para mezclas de moldeo realizadas con sistema de moldeo FA (resina furánica)

Sistema de moldeo	Marca de aglomerantes	Arena	Cantidad de aglomerantes en porcentaje de arena	Tiempo de polimerización	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación
FA	SQ	Sílice, Sierra Central	1%	2	0,416	0,0250	6,02%
				4	0,451	0,0141	3,13%
			1,40%	2	0,589	0,0440	7,48%
				4	0,607	0,0576	9,49%
	SQ	Sílice, Sibelco	1%	2	0,395	0,0289	7,33%
				4	0,436	0,0397	9,10%
			1,40%	2	0,469	0,0388	8,29%
				4	0,506	0,0401	7,92%
	SQ	Corindón, Cast Ball	1%	2	0,395	0,0263	6,65%
				4	0,423	0,0240	5,69%
			1,40%	2	0,472	0,0391	8,29%
				4	0,543	0,0272	5,00%

(Fuente: Propia)

## Uso de gráficas Weibull

Los datos de resistencia obtenidos de cada mezcla de moldeo se ajustaron a una distribución Weibull. Usando la Figura 3.8 se mostrará el uso de las gráficas de Weibull para cada mezcla de moldeo, en la Figura 3.8 se muestran los resultados de la resistencia de la mezcla de moldeo y la probabilidad de falla de dicho valor de resistencia. Para conocer los resultados antes mencionados se debe hacer lo siguiente.

### Ejemplo:

Se requiere conocer a que valor de resistencia y que probabilidad de falla tiene el número “-1” y “-0,8” pertenecientes al eje X. Además, se requiere conocer la resistencia a una probabilidad de falla de 63% para 2 y 4 horas de tiempo de polimerización. Para este ejemplo se usará la Figura 3.8.

Para conocer la resistencia y probabilidad de falla antes mencionadas, se debe igualar los valores del eje X que se desea conocer a lo que representa el eje X, es decir  $\ln(\sigma)$  (Ecuación 3.1) y para conocer la probabilidad de falla de esos valores se debe trazar una recta perpendicular al eje X que pase por el valor deseado y corte con la recta de resistencia que se desea saber la probabilidad de falla (2 o 4 horas de tiempo de polimerización), una vez que haya intersecado la recta perpendicular y la recta de resistencia se debe trazar una recta perpendicular al eje Y que pase por el punto donde se intersecaron las rectas antes mencionadas (Figura 3.8.). El valor marcado en el eje Y después de haber hecho el proceso antes descrito se debe igualar a lo que representa el eje Y es decir “ $\ln(\ln(1/(1-F)))$ ” (Ecuación 3.2). Lo mismo se puede hacer cuando se requiera conocer la resistencia con una probabilidad de falla dada, es decir el proceso inverso.

Por otra parte, si se desea conocer la resistencia que tiene la probabilidad de falla del 63% se debe igualar el valor donde la línea de resistencia corta con el eje X y el eje Y es “0” (Figura 3.8. valor encerrado con círculos). Este valor debe ser igualado a lo que representa el eje X, es decir  $\ln(\sigma)$  (Ecuación 3.3).

Hay ocasiones que no se puede observar a simple vista el valor donde la línea de resistencia corta con el eje X, para estas ocasiones se debe sacar la ecuación de la recta con ayuda de cualquier programa de evaluación de datos como Excel, Matlab, etc. Esta ecuación se debe igualar a “0” y de esta manera de conocer el valor que corresponde a la resistencia que tiene una probabilidad de falla del 63% (Ecuación 3.4)

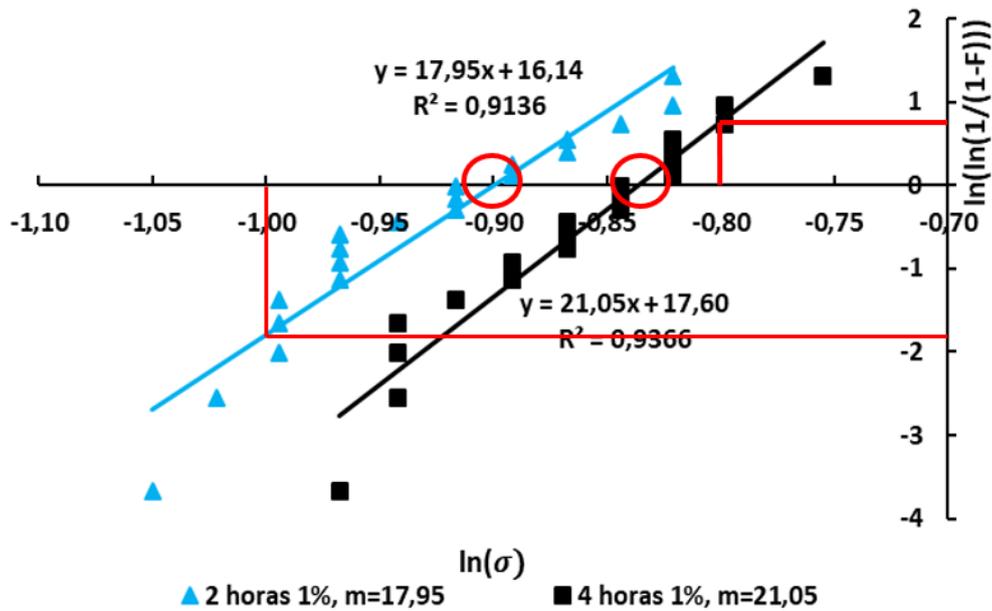


Figura 3.8. Ejemplo de uso de gráfica Weibull con resultados de resistencia de la mezcla de moldeo hecha con corindón Cast Ball-SQ-FA 1% (Fuente: Propia)

Resistencia a la cual equivale el valor de “-1” del eje X a 2 horas de tiempo de polimerización (línea celeste).

$$\ln(\sigma) = -1 \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$\sigma = e^{-1}$$

$$\sigma = 0,368 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma \approx 0,37 \text{ (MPa)}$$

Probabilidad de falla correspondiente al valor “-1” o resistencia  $\sigma \approx 0,37 \text{ (MPa)}$ .

$$-1,9 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F}\right)\right) \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

$$F = 0,1389$$

$$F = 13,89\%$$

Resistencia y probabilidad de falla correspondiente al valor “-0,8” del eje X para 4 horas de tiempo de polimerización.

$$\ln(\sigma) = -0,8$$

$$\sigma = e^{-0,8}$$

$$\sigma = 0,449 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma \approx 0,45 \text{ (MPa)}$$

$$0,8 = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F}\right)\right)$$

$$F = 0,8919$$

$$F = 89,19\%$$

Resistencia para una probabilidad de falla del 63%. Para 2 y 4 horas de tiempo de polimerización.

$$\ln(\sigma) = -0,9 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

$$\sigma = e^{-0,9}$$

$$\sigma = 0,41 \text{ (MPa)} ; 2 \text{ horas de tiempo de polimerización}$$

$$\ln(\sigma) = -0,83$$

$$\sigma = e^{-0,83}$$

$$\sigma = 0,43 \text{ (MPa)} ; 4 \text{ horas de tiempo de polimerización}$$

En caso de que exista dificultad de saber el valor donde se cruza la recta de resistencia y el eje X para conocer el valor que corresponde a la resistencia que tiene una probabilidad de falla del 63%, se debe sacar la ecuación de la recta e igualarla a cero.

$$y = 17,95x + 16,14 = 0 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$x = -\frac{16,14}{17,95} = -0,899164$$

$$x \approx -0,9 = \ln(\sigma)$$

El valor de  $x \approx -0,9$  nos regresa a la ecuación 3.3 y se obtiene la resistencia con una probabilidad de falla del 63% a un tiempo de polimerización de 2 horas.

**Gráficas de resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull para mezclas de moldeo utilizando aglomerantes fenólico-uretano (PUNB)**

Las gráficas de Weibull mostradas a continuación muestran los datos obtenidos con cada mezcla de moldeo mostrada en la Tabla 3.11 correspondiente al sistema de moldeo PUNB (fenólico- uretano), a dos tiempos de polimerización 2 y 4 horas resaltados con color celeste y negro respectivamente.

**Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y aglomerantes fenólico-uretano.**

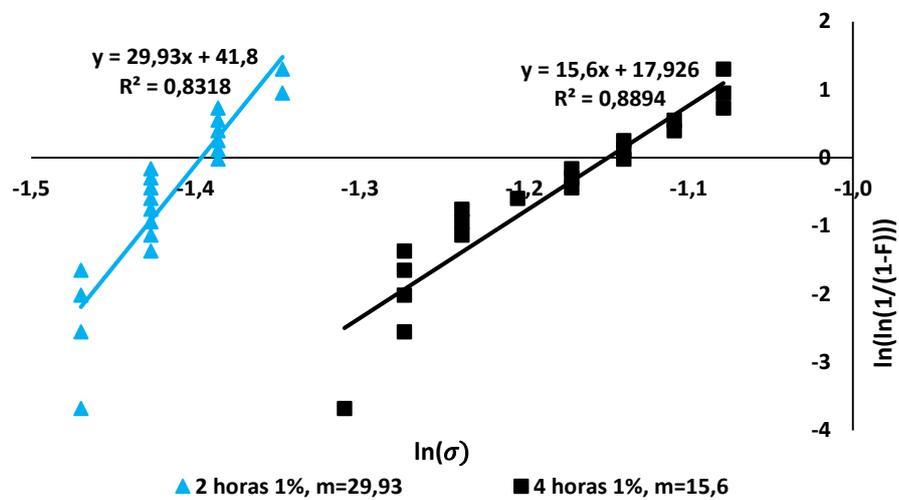


Figura 3.9. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

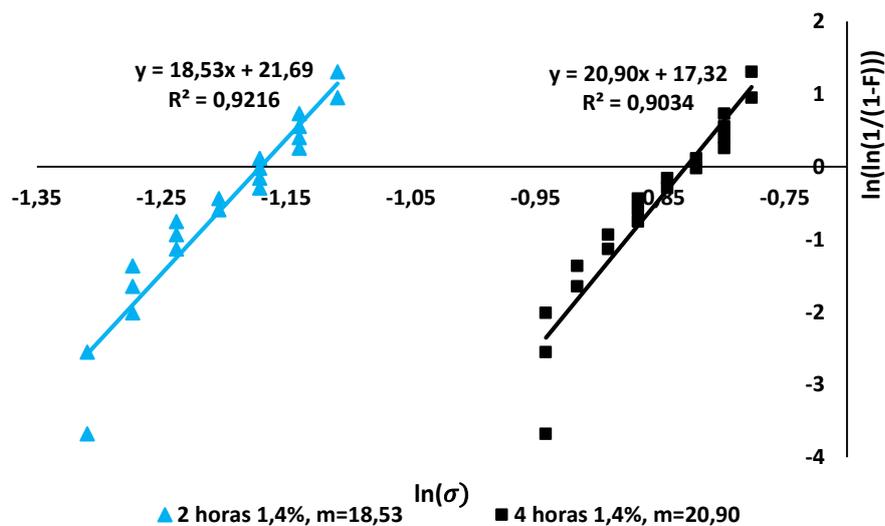


Figura 3.10. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-PUNB 1,4%.  
(Fuente: Propia)

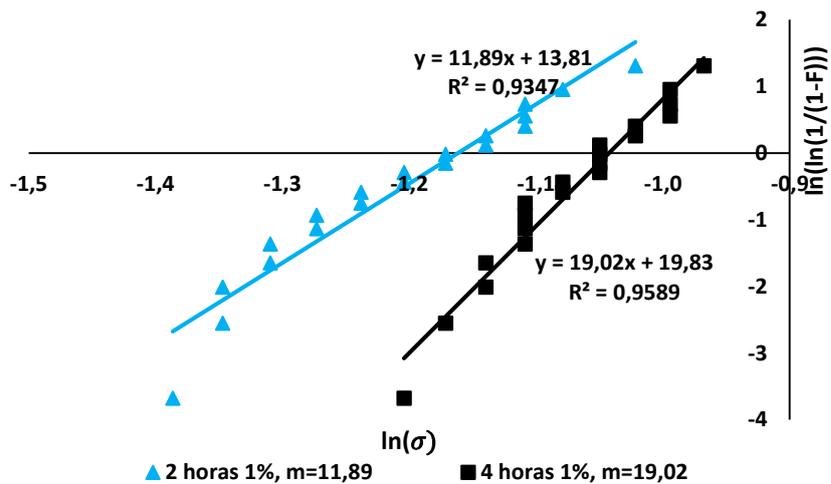


Figura 3.11. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-Mancuso-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

**Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y aglomerantes fenólico-uretano.**

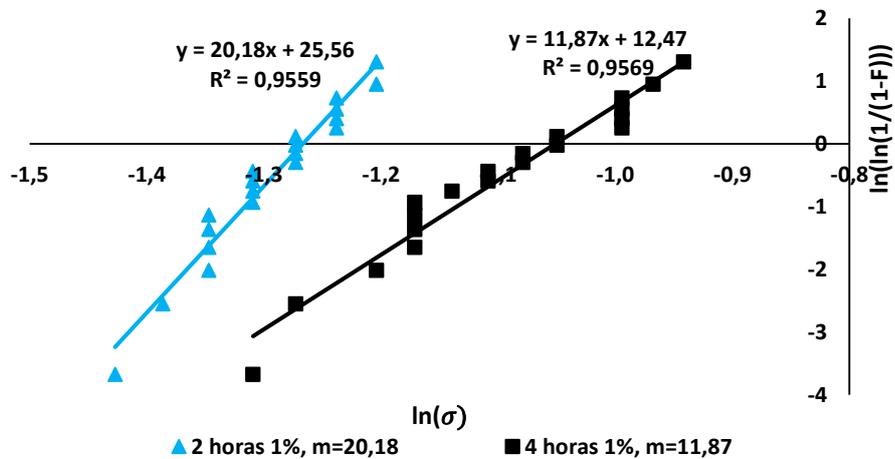


Figura 3.12. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

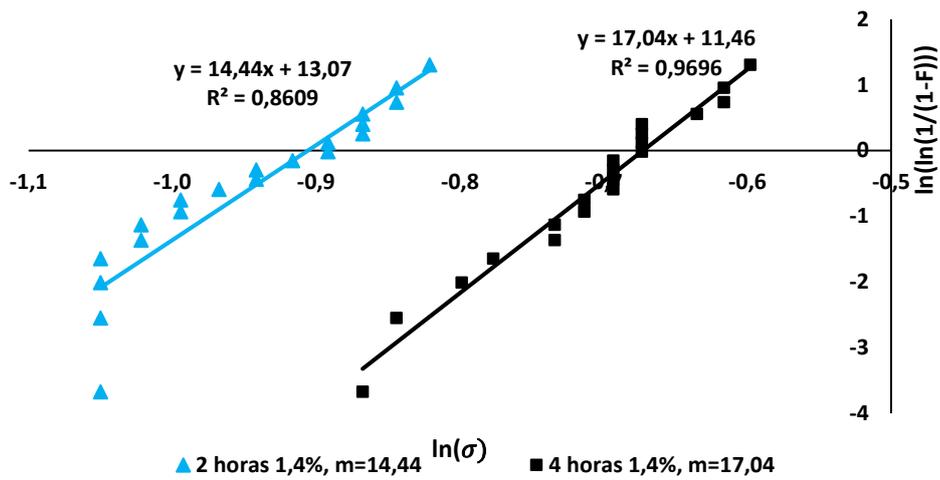


Figura 3.13. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-PUNB 1,4%.  
(Fuente: Propia)

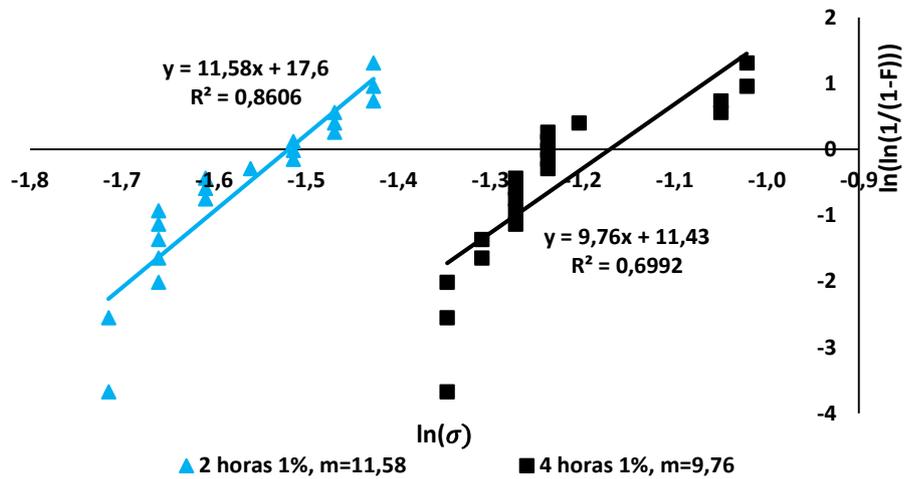


Figura 3.14. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-Mancuso-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

**Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y resina fenólico-uretano**

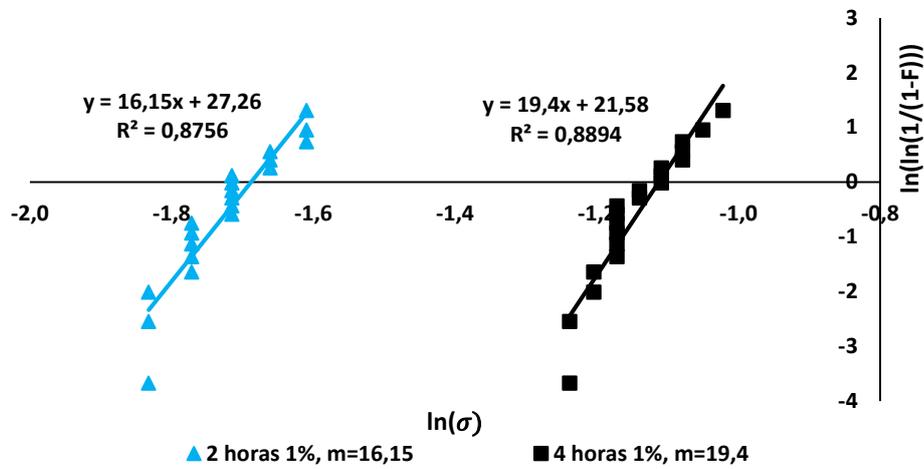


Figura 3.15. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

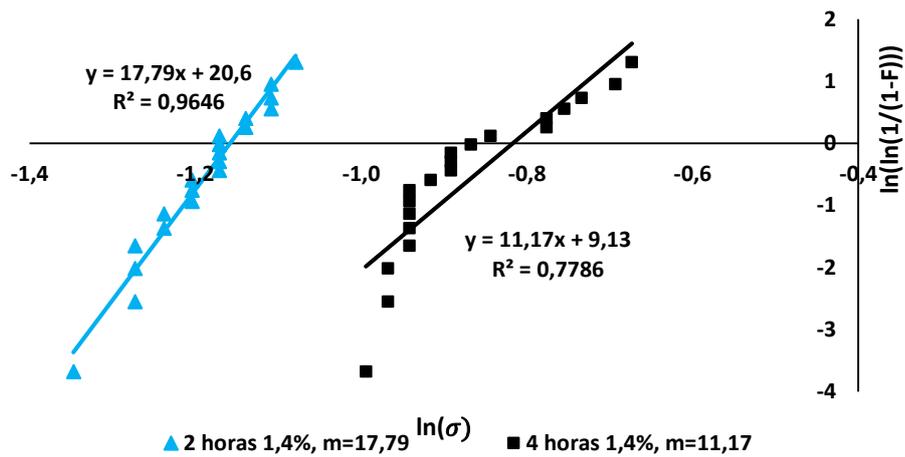


Figura 3.16. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-PUNB 1,4%.  
(Fuente: Propia)

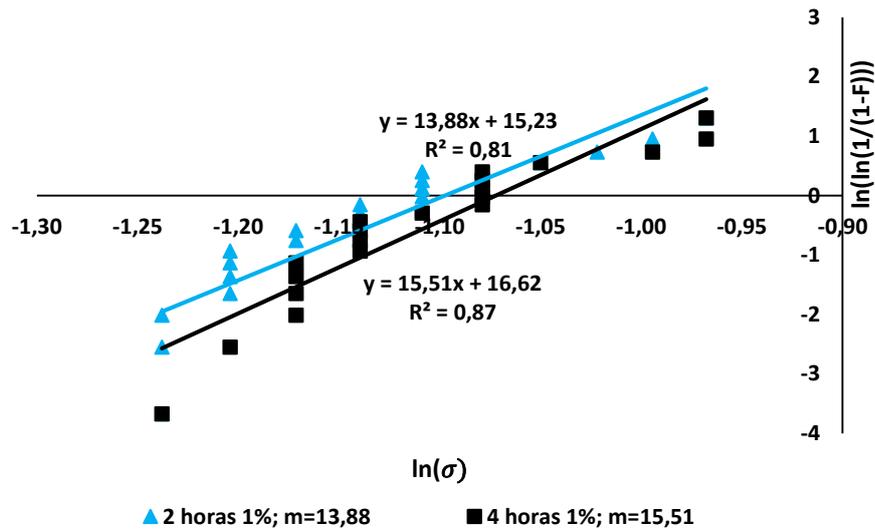


Figura 3.17. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-Mancuso-PUNB 1%.  
(Fuente: Propia)

### Gráficas de resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull para mezclas de moldeo utilizando aglomerante furánico (FA)

Las gráficas de Weibull mostradas a continuación muestran los datos obtenidos con cada mezcla de moldeo mostrada en la Tabla 3.11 correspondiente al sistema de moldeo FA (resina furánica), a dos tiempos de polimerización 2 y 4 horas resaltadas con color celeste y negro respectivamente.

### Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y aglomerante furánico

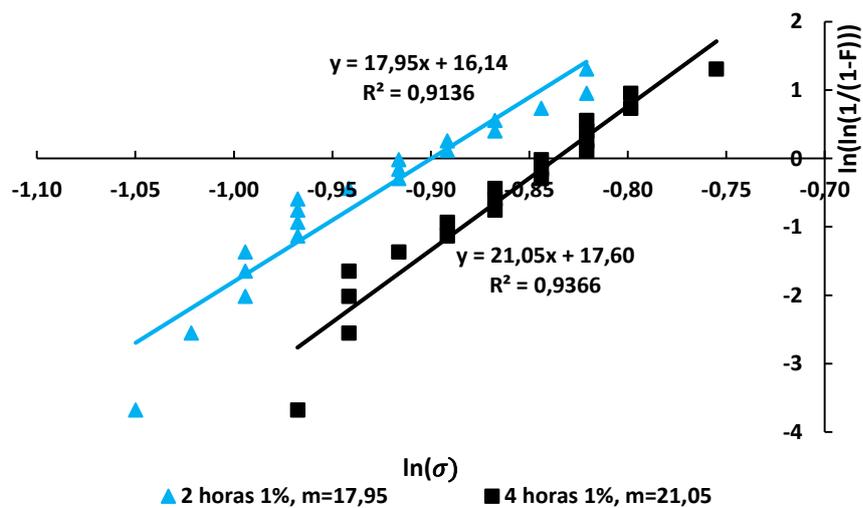


Figura 3.18. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-FA 1%.  
(Fuente: Propia)

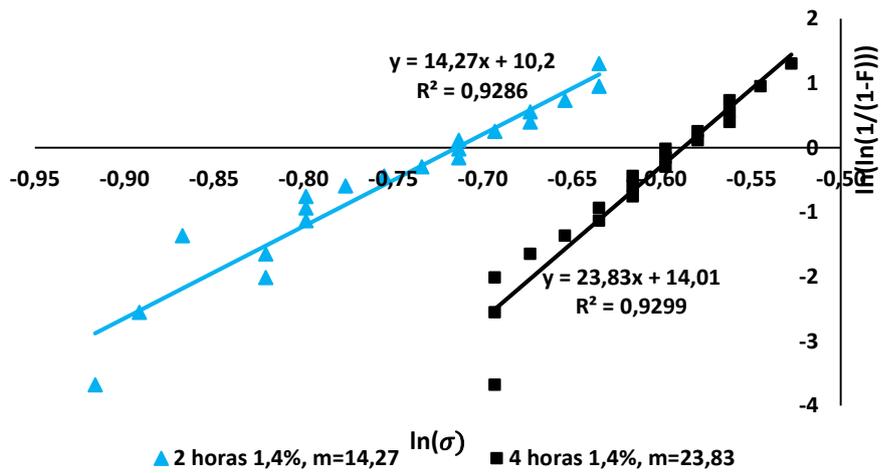


Figura 3.19. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, corindón Cast Ball-SQ-FA 1%.  
(Fuente: Propia)

**Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y aglomerante furánico.**

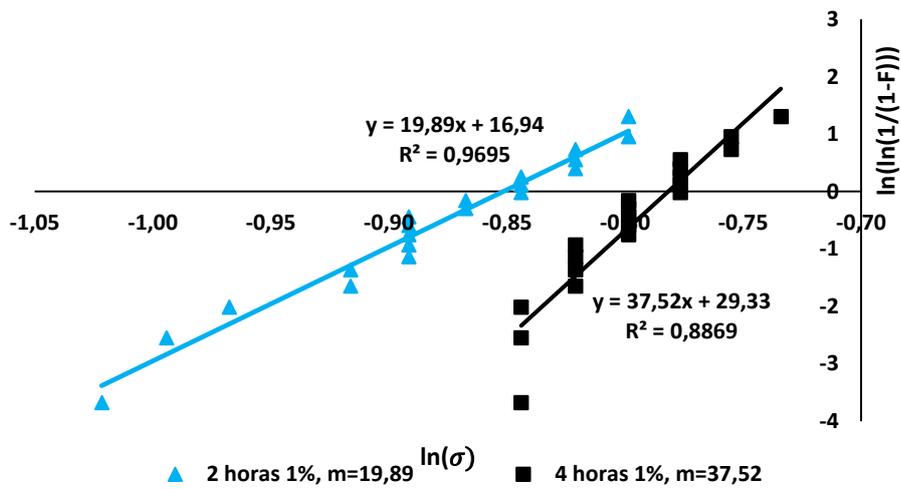


Figura 3.20. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-FA 1%.  
(Fuente: Propia)

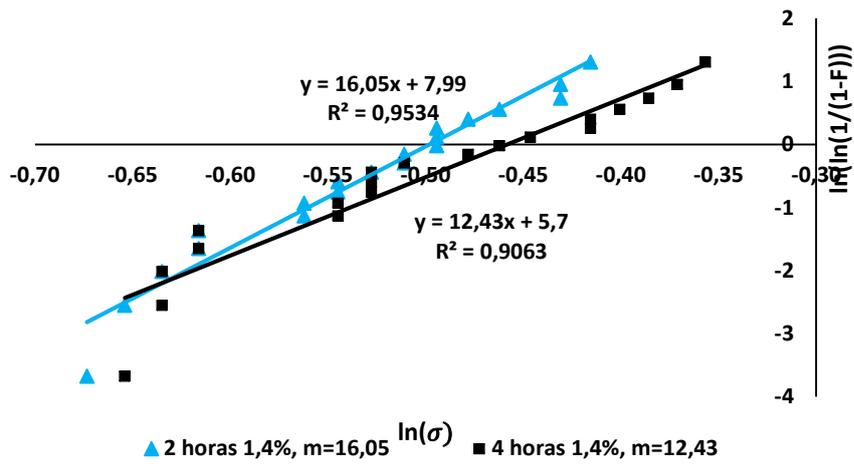


Figura 3.21. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sierra Central-SQ-FA 1,4%.  
(Fuente: Propia)

**Resultados de resistencia a la tracción ajustados a una distribución Weibull de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y aglomerante furánico.**

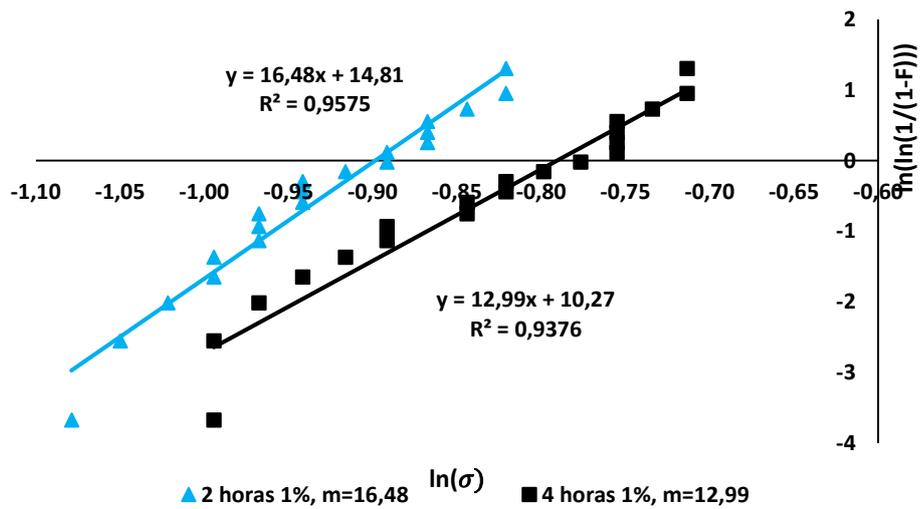


Figura 3.22. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-FA 1%.  
(Fuente: Propia)

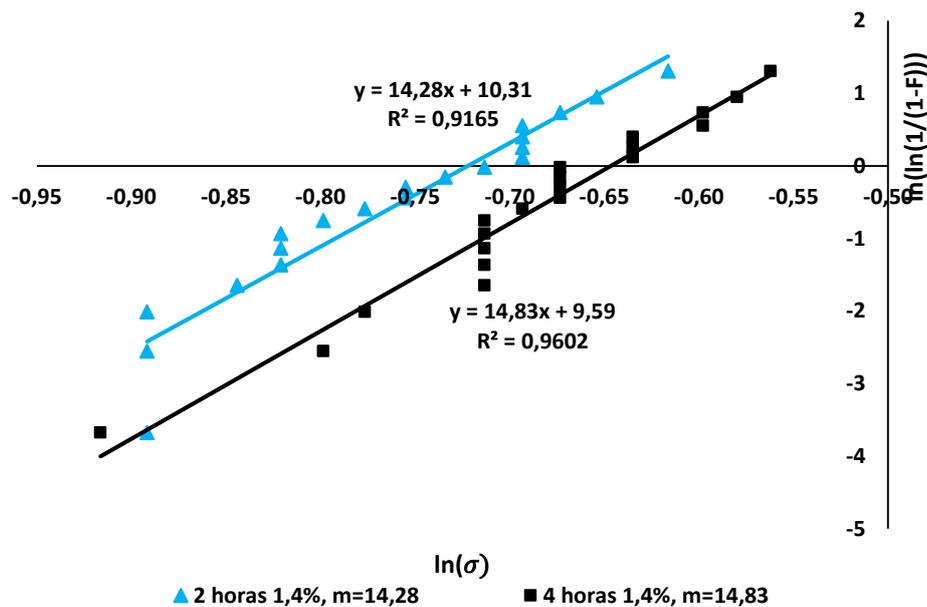


Figura 3.23. Resistencia a la tracción ajustada a una distribución Weibull, arena de sílice Sibelco-SQ-FA 1,4%. (Fuente: Propia)

En las figuras previas se muestra los resultados de resistencia a la tracción ajustadas a una distribución Weibull mostradas se utilizó dos colores para definir tiempos de polimerización, celeste (2 horas) y negro (4 horas).

Según Sharma. A et all, McDowell et all y Zhang. X et all, menciona que en una gráfica de Weibull de datos de resistencia, cuanto más hacia la derecha se encuentra la distribución de datos, la resistencia es más elevada.[32][11][33]

Esta afirmación está acorde con los resultados de resistencia a la tracción de 2 y 4 horas de cada mezcla de moldeo debido a que la resistencia aumenta de acorde al tiempo de polimerización, alcanzando un valor máximo a 4 horas de tiempo de polimerización según los fabricantes de resinas.

Por otra parte, las distribuciones de resultados de resistencia de probetas de tracción obedecen a una dispersión en función de la cantidad y tamaño de defectos presentes en los granos de arena base y mezcla de moldeo.

De acuerdo Holtzer. M, Kmita. A, Yang-lei. L et all, Sharma. A et all, Petrus. L et all, Zhang. X et all, entre otros. La mezcla de moldeo tiene dos fuentes principales de defectos, la primera fuente está relacionada directamente con los granos de arena base debido a que los mismos tienen defectos en su estructura como pequeñas fisuras o concentradores de esfuerzos. La segunda fuente tiene relación con la mezcla de moldeo (conjunto arena base-aglomerantes) debido a que durante la unión entre granos de arena base por medio del

aglomerante quedaran pequeñas zonas donde el aglomerante no ha recubierto al grano de arena base, dichas zonas donde no existe aglomerante para la unión entre granos de arena base son considerados defectos. Esta falta de unión aumenta cuando se trata de unir granos irregulares entre sí o granos irregulares con regulares. La menor cantidad de defectos se presenta cuando se usa arenas base con granos regulares. Por lo tanto, para una misma cantidad de aglomerante se tendrá una elevada resistencia con granos regulares que con granos irregulares. [6][40][32][46] [12]

Las figuras antes ilustradas muestran una variación de sus resultados de resistencia entre probetas elaboradas con la misma mezcla de moldeo y ensayadas a un mismo tiempo de polimerización. Esta dispersión está en función de la distribución del tamaño y cantidad de defectos en cada probeta de tracción elaborada, como muestra de esa dispersión está el módulo de Weibull.

El módulo de Weibull está relacionado con la distribución de defectos en un material; es decir mientras el módulo de Weibull tenga valores pequeños existe una alta distribución de defectos que harán variar a la resistencia de un material, en consecuencia, mientras más defectos estén presentes en un material su resistencia disminuirá y cuando menos defectos tenga ese mismo material tendrá una resistencia elevada. Por lo tanto, ante un bajo esfuerzo aplicado una pequeña fracción de probetas contienen una cantidad suficiente de defectos o contiene defectos suficientemente grandes para causar la fractura (probabilidad de falla baja o probabilidad de supervivencia alta), algunas más fallarán ante un esfuerzo intermedio aplicado y solo pocas probetas tendrán una pequeña cantidad de defectos o defectos suficientemente grandes para fallar ante un alto esfuerzo aplicado (probabilidad de falla alta o probabilidad de supervivencia baja). [13][32][11][31][34]

Como consecuencia se obtiene lo siguiente, de acuerdo a los datos del ejemplo realizado con la Figura 3.8. Solo un 13,89% de las probetas de tracción tendrá una cantidad considerable de defectos o defectos suficientes grandes para fallar ante un esfuerzo bajo aplicado de 0,37 (MPa).

Una vez considerado que la resistencia de la mezcla de moldeo varía de acuerdo distribución del tamaño y cantidad de defectos. Diversos autores recomiendan que en materiales en los cuales su resistencia varía en función de sus defectos como en vidrios, cerámicas o algunos materiales compuestos; la resistencia que debe ser reportada es la resistencia que tiene una probabilidad de falla del 63%. [34][32][13][31][33]

Tabla 3.24. Módulo de Weibull de cada mezcla de moldeo ensayada y su resistencia a la tracción con una probabilidad de falla  $F(V)$  de 63%.

Sistema de moldeo	Marca de aglomerantes	Marca de Arena	Cantidad de aglomerantes	Tiempo de polimerización	Código de Identificación	Módulo de Weibull	Resistencia para $F(V)$ de 63%
PUNB	SQ	Sierra Central	1%	2	PUNB-SC-SQ1%-2	20,18	0,28
				4	PUNB-SC-SQ1%-4	11,87	0,35
			1,40%	2	PUNB-SC-SQ1,4%-2	14,44	0,4
				4	PUNB-SC-SQ1,4%-4	17,04	0,51
	SQ	Sibelco	1%	2	PUNB-SI-SQ1%-2	16,15	0,18
				4	PUNB-SI-SQ1%-4	19,4	0,33
			1,40%	2	PUNB-SI-SQ1,4%-2	17,19	0,32
				4	PUNB-SI-SQ1,4%-4	11,17	0,43
	SQ	Cast Ball	1%	2	PUNB-CB-SQ1%-2	29,93	0,25
				4	PUNB-CB-SQ1%-4	15,6	0,31
			1,40%	2	PUNB-CB-SQ1,4%-2	18,53	0,31
				4	PUNB-CB-SQ1,4%-4	20,9	0,44
	Mancuso	Sierra Central	1%	2	PUNB-SC-MA1%-2	11,58	0,22
				4	PUNB-SC-MA1%-4	9,76	0,29
	Mancuso	Sibelco	1%	2	PUNB-SI-MA1%-2	13,88	0,33
				4	PUNB-SI-MA1%-4	15,51	0,34
	Mancuso	Cast Ball	1%	2	PUNB-CB-MA1%-2	11,89	0,31
				4	PUNB-CB-MA1%-4	19,02	0,35
FA	SQ	Sierra Central	1%	2	FA-SC-SQ1%-2	19,89	0,43
				4	FA-SC-SQ1%-4	37,52	0,46
			1,40%	2	FA-SC-SQ1,4%-2	16,05	0,61
				4	FA-SC-SQ1,4%-4	12,43	0,63
	SQ	Sibelco	1%	2	FA-SI-SQ1%-2	16,48	0,41
				4	FA-SI-SQ1%-4	12,99	0,46
			1,40%	2	FA-SI-SQ1,4%-2	14,28	0,49
				4	FA-SI-SQ1,4%-4	14,83	0,51
	SQ	Cast Ball	1%	2	FA-CB-SQ1%-2	17,95	0,41
				4	FA-CB-SQ1%-4	21,05	0,43
			1,40%	2	FA-CB-SQ1,4%-2	14,27	0,49
				4	FA-CB-SQ1,4%-4	23,93	0,56

(Fuente: Propia)

Las figuras 3.24 a 3.28 muestran los resultados de resistencia a la tracción de distintas mezclas de moldeo clasificadas según el tipo de resina o tipo de arena base usada. Cabe destacar que la resistencia más alta obtenida usando el sistema de moldeo fenólico-uretano (PUNB) se obtuvo con arena de sílice Sierra Central, 1,4% de cantidad de aglomerante a 4 horas de tiempo de polimerización alcanzando un valor de resistencia de

0,51 (MPa). En cambio, la resistencia más alta obtenida con resina furánica fue conseguida con arena de sílice Sierra Central, 1,4% de cantidad de aglomerantes a 4 horas de tiempo de polimerización alcanzando un valor de 0,63 (MPa). En ambos casos con una probabilidad de falla de 63%.

Los valores más altos de resistencia se obtuvieron con arena de sílice Sierra Central (Forma subangular, índice AFS 39,63 y 0,34% de polvo fino), seguido por corindón Cast Ball (forma redonda, índice AFS 51,46 y 1,94% de polvo fino) o en ocasiones arena de sílice Sibelco (forma subangular, índice AFS 61,50 y 2,12% de polvo fino).

Se había dicho anteriormente que para una misma cantidad de aglomerantes se obtiene mayor resistencia con formas regulares que con irregulares, en el caso de corindón Cast Ball por su alto contenido de polvo fino su resistencia es menor a la de arena de sílice Sierra Central, comparable con arena de sílice Sibelco que tiene una cantidad similar de polvo fino.

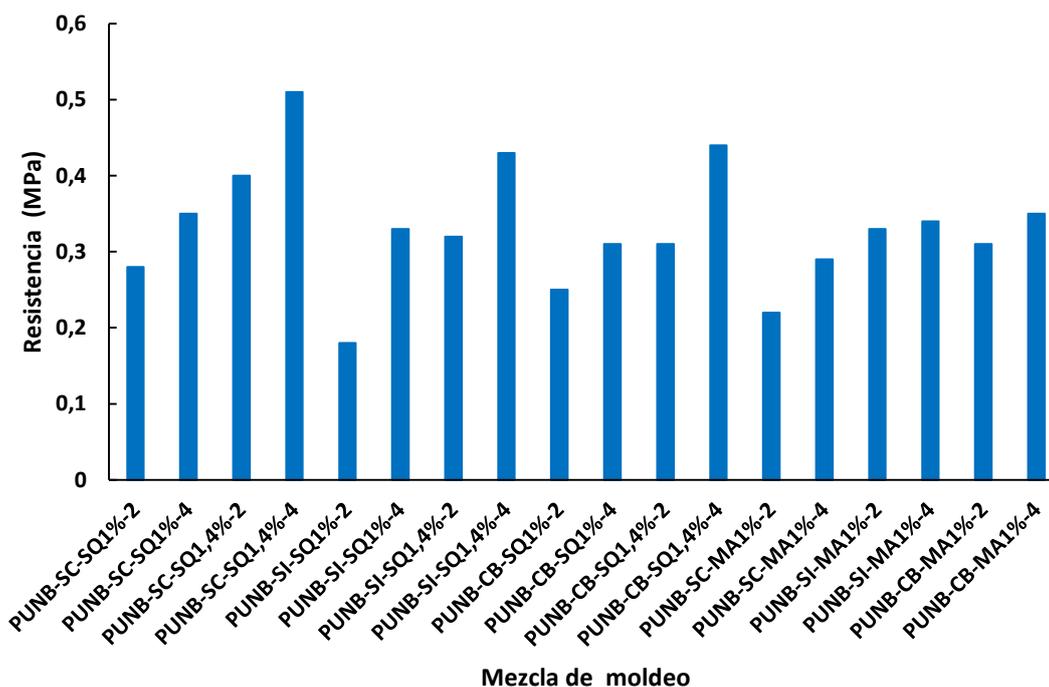


Figura 3.24. Resistencia a la tracción con una probabilidad de falla de 63%, usando sistema de moldeo PUNB. (Fuente: Propia)

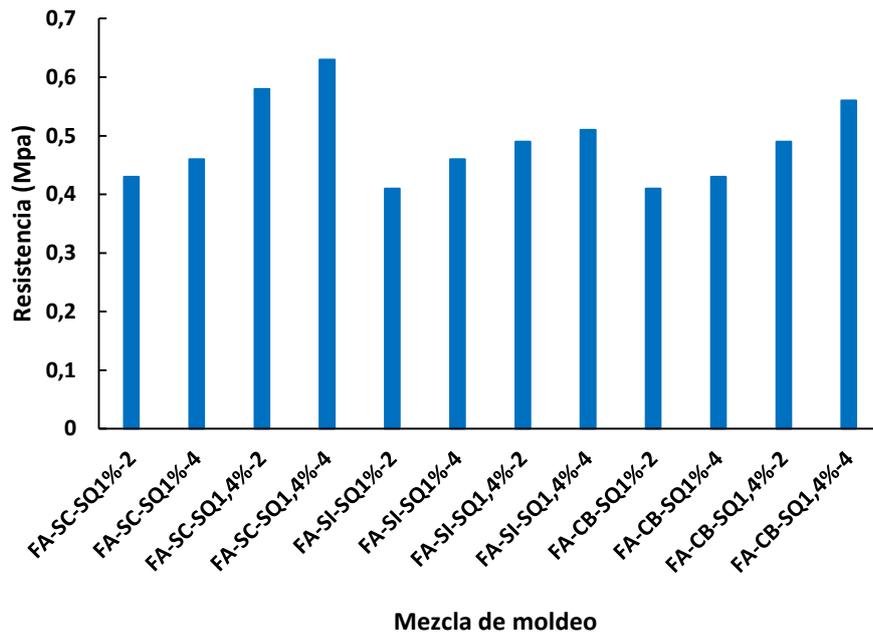


Figura 3.25. Resistencia a la tracción con una probabilidad de falla de 63%, usando sistema de moldeo FA.  
(Fuente: Propia)

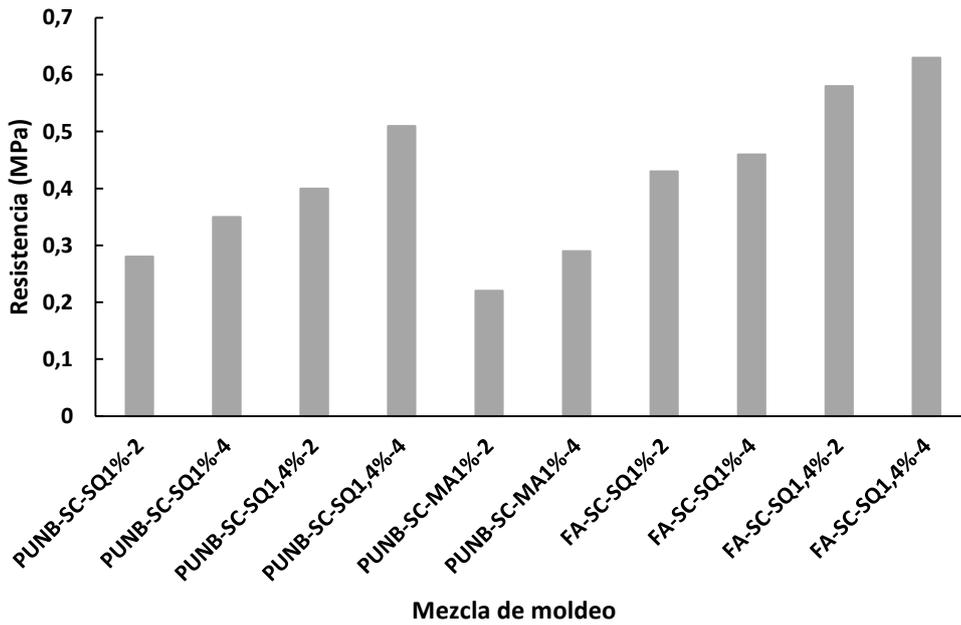


Figura 3.26. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y sistema de moldeo PUNB o FA.  
(Fuente: Propia)

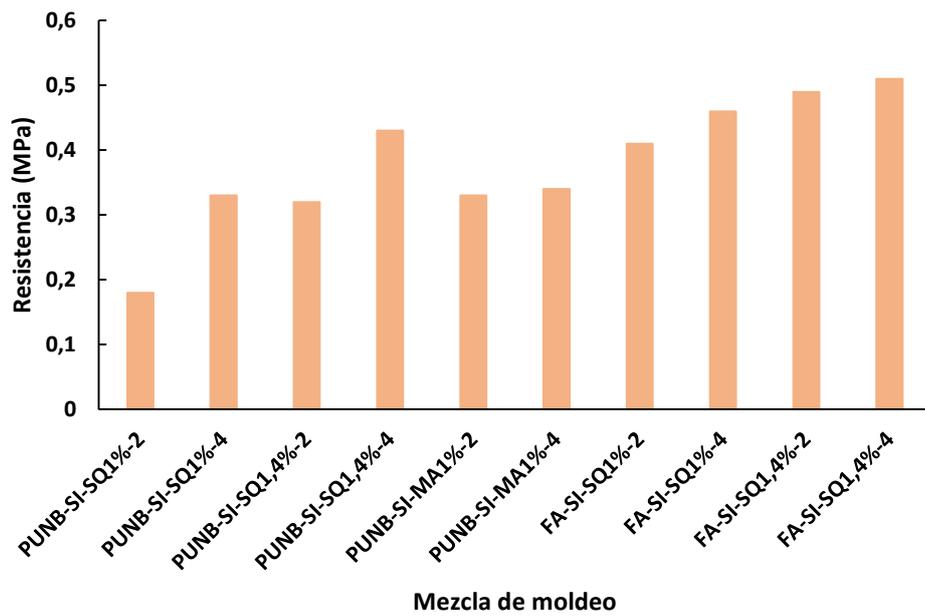


Figura 3.27. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y sistema de moldeo PUNB o FA. (Fuente: Propia)

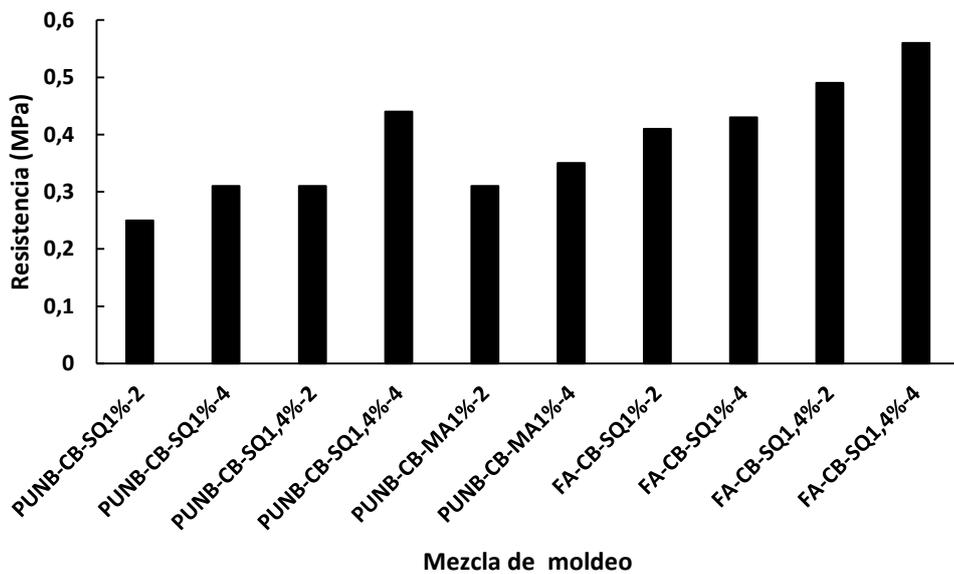


Figura 3.28. Resistencia a la tracción con probabilidad de falla de 63% de mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y sistema de moldeo PUNB o FA. (Fuente: Propia)

### 3.2.2. Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad se realizó siguiendo el procedimiento dado en el capítulo 2 apartados 2.1.6. y 2.1.8, se realizó 6 probetas normalizadas para ensayos de permeabilidad de cada mezcla de moldeo mostrada en la Tabla 3.11, fueron fabricadas 6 probetas para 2, 4 y 24 horas de tiempo de polimerización y ensayadas a dichas horas. Los datos obtenidos son presentados en un diagrama de caja y bigotes para observar su dispersión, posteriormente se realiza un análisis de varianza ANOVA para comparar múltiples medias y Pruebas T para evaluar las siguientes hipótesis nulas:

- No existe influencia del tiempo sobre la permeabilidad (hipótesis nula 1); para este análisis se eligen datos que mantienen la misma arena base, sistema de moldeo, marca y cantidad de aglomerantes.
- No existe influencia de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad (hipótesis nula 2); para este análisis se eligen datos que mantienen la misma arena base, sistema de moldeo y marca de aglomerante.

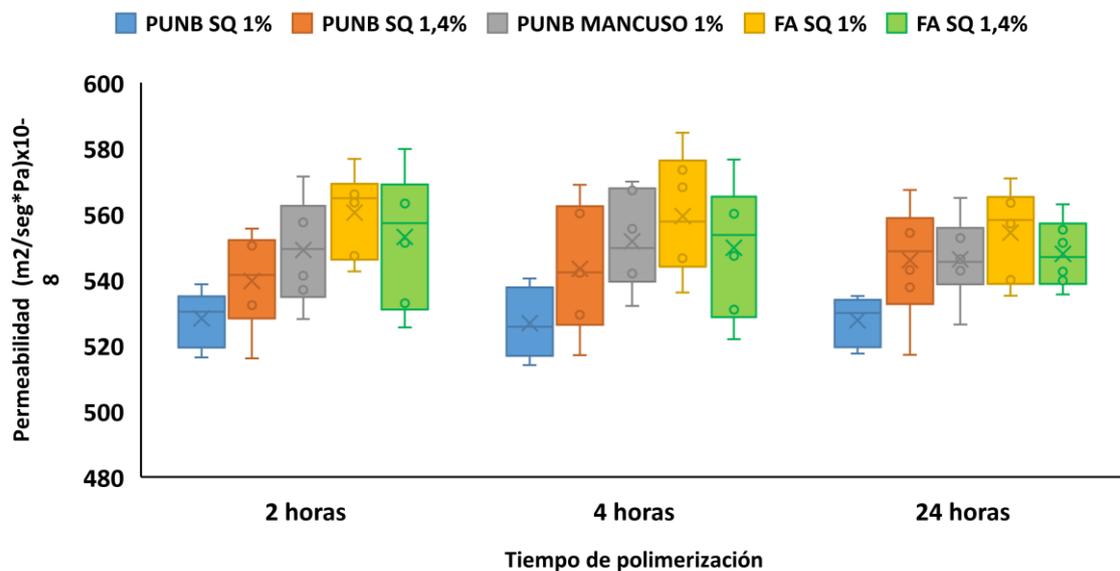


Figura 3.29. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con corindón Cast Ball y aglomerantes fenólico-uretano o furánico a distintos tiempos de polimerización.  
(Fuente: Propia)

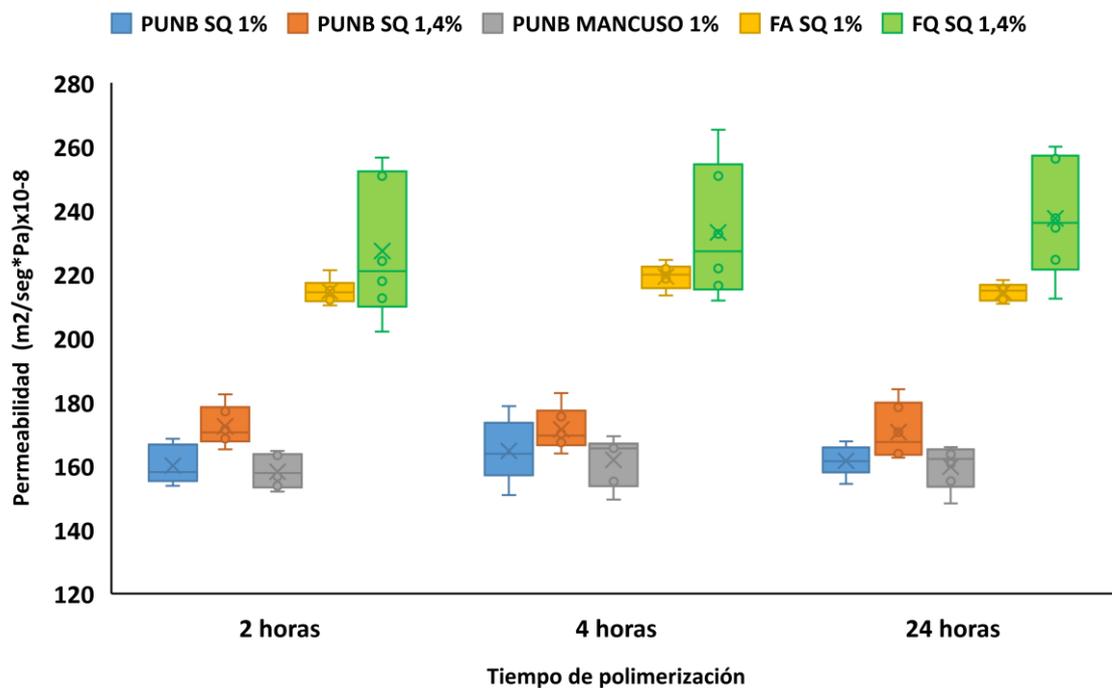


Figura 3.30. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sibelco y aglomerantes fenólico-uretano y furánico a distintos tiempos de polimerización. (Fuente: Propia)

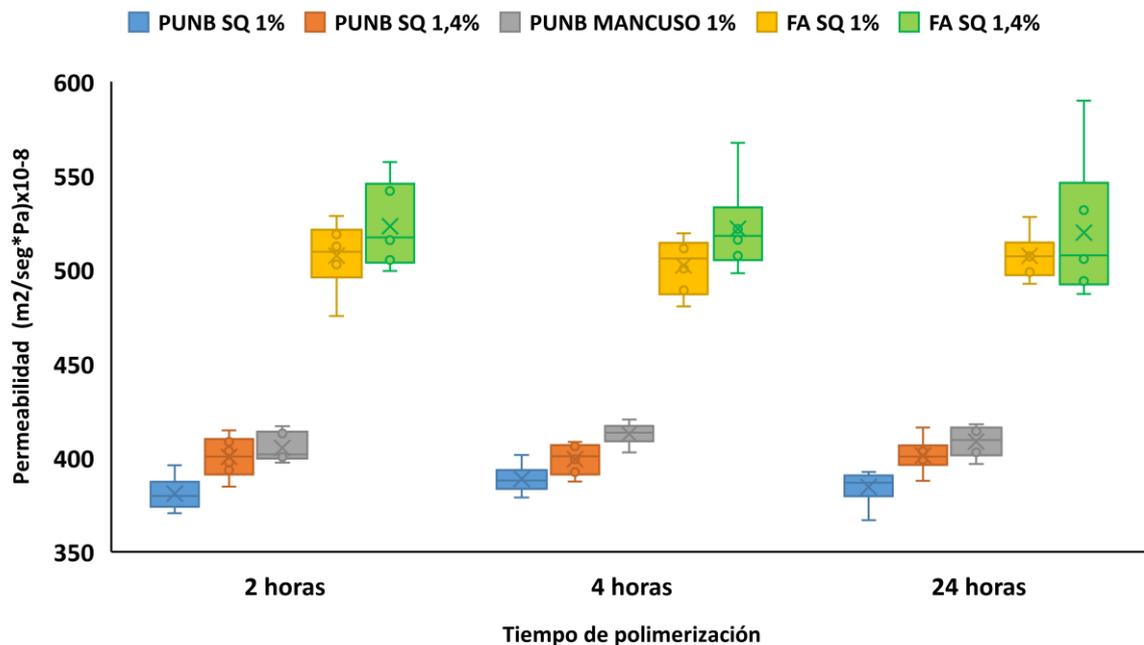


Figura 3.31. Diagramas de caja y bigotes de resultados de permeabilidad, mezclas de moldeo elaboradas con arena de sílice Sierra Central y aglomerantes fenólico-uretano o furánico a distintos tiempos de polimerización. (Fuente: Propia)

**Gráficas de permeabilidad para mezclas de moldeo elaboradas con aglomerante fenólico-uretano (PUNB) y distintas arenas base.**

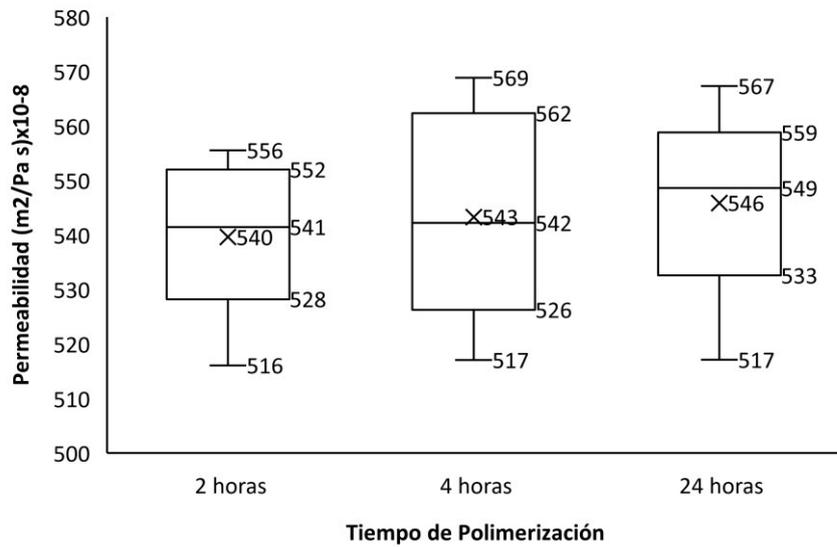


Figura 3.32. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB ShengQuan 1.4%.  
(Fuente: Propia)

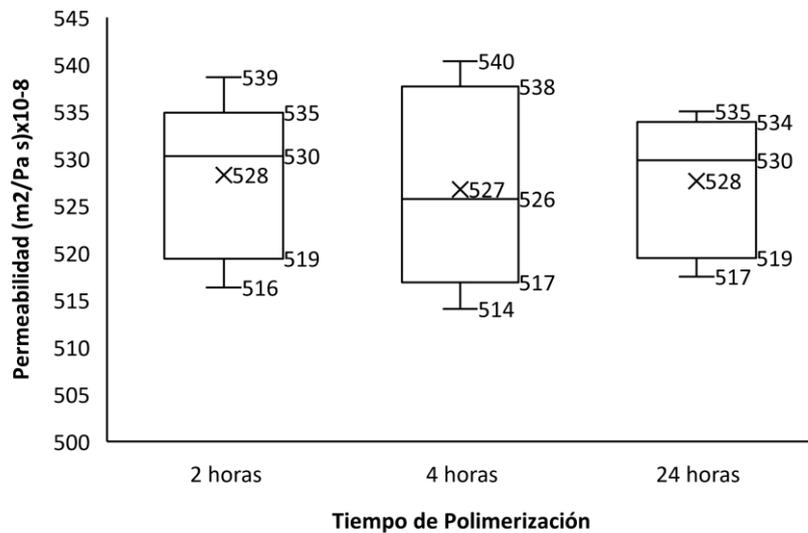


Figura 3.33. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

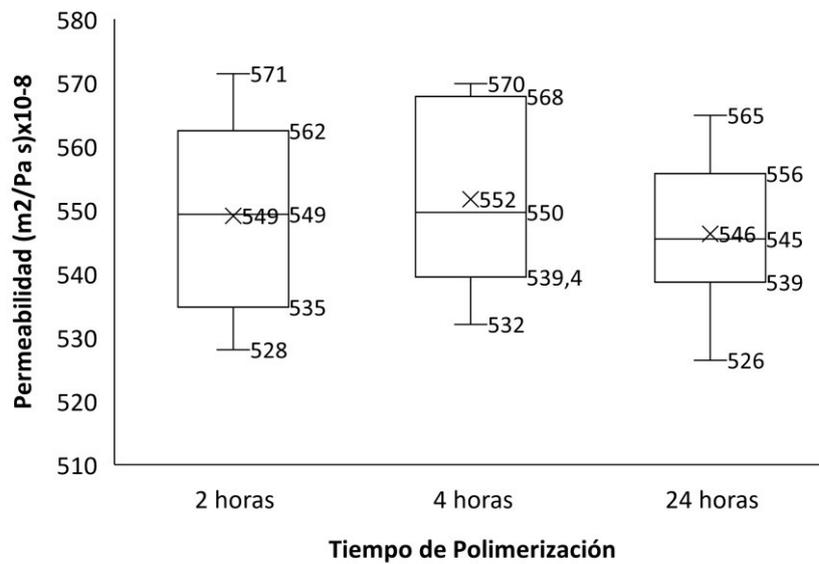


Figura 3.34. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-PUNB Mancuso 1%.  
(Fuente: Propia)

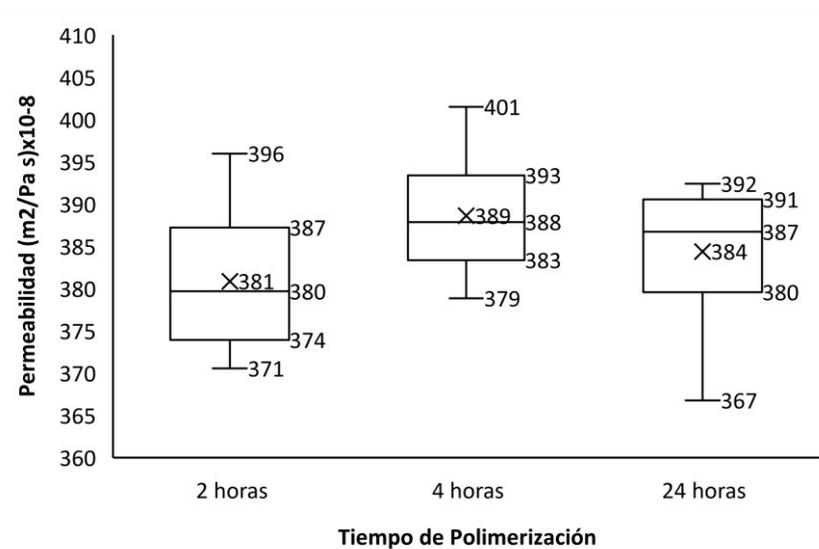


Figura 3.35. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

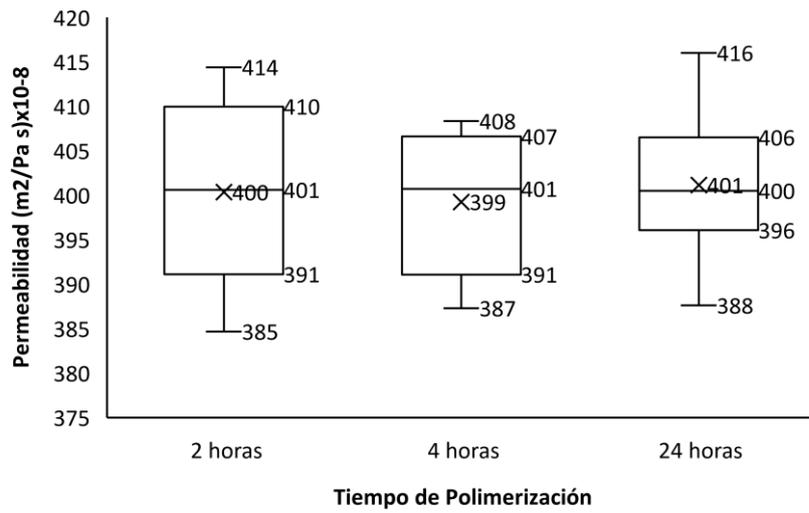


Figura 3.36. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB ShengQuan 1,4%.  
(Fuente: Propia)

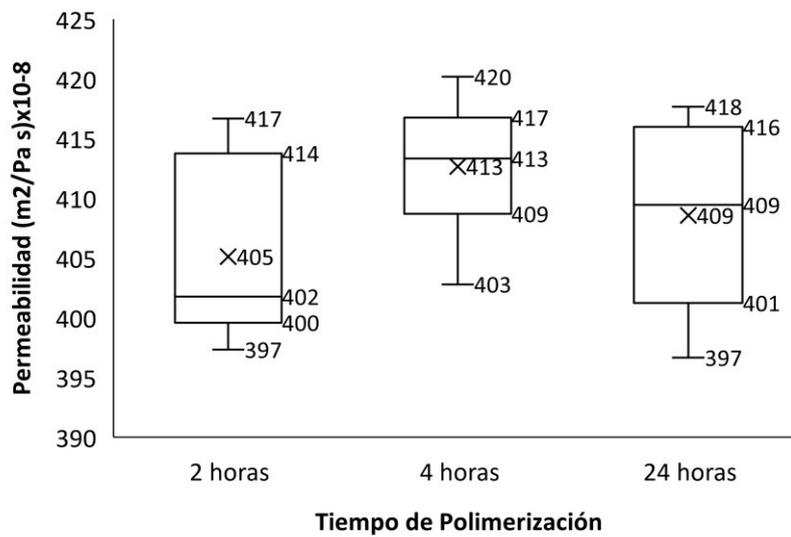


Figura 3.37. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-PUNB Mancuso 1%.  
(Fuente: Propia)

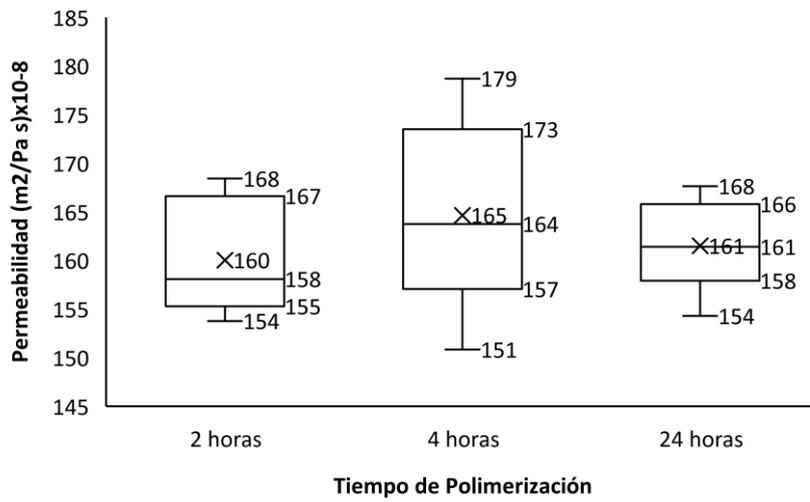


Figura 3.38. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

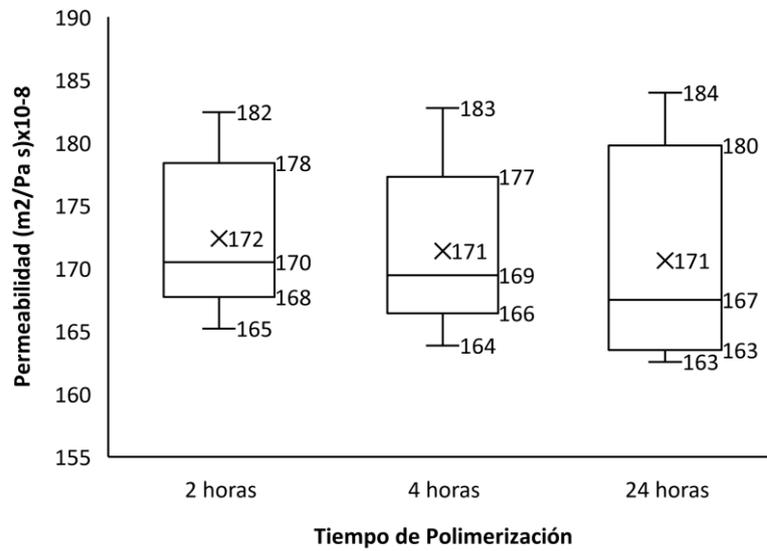


Figura 3.39. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB ShengQuan 1,4%.  
(Fuente: Propia)

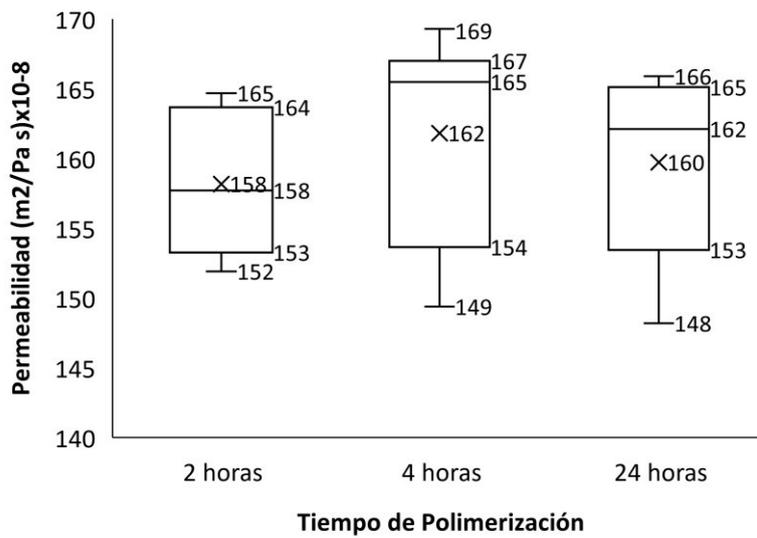


Figura 3.40. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-PUNB Mancuso 1%.  
(Fuente: Propia)

**Gráficas de permeabilidad para mezclas de moldeo elaboradas con aglomerante furánico (FA) y distintas arenas base.**

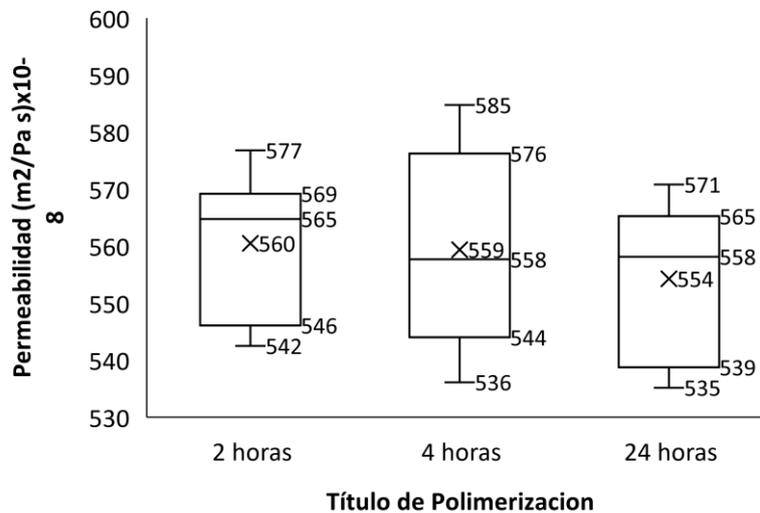


Figura 3.41. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-FA ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

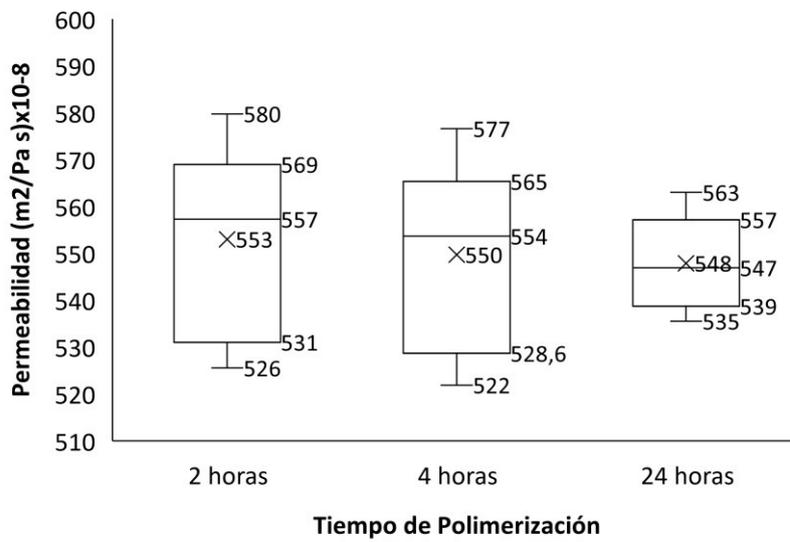


Figura 3.42. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, corindón Cast Ball-FA ShengQuan 1,4%.  
(Fuente: Propia)

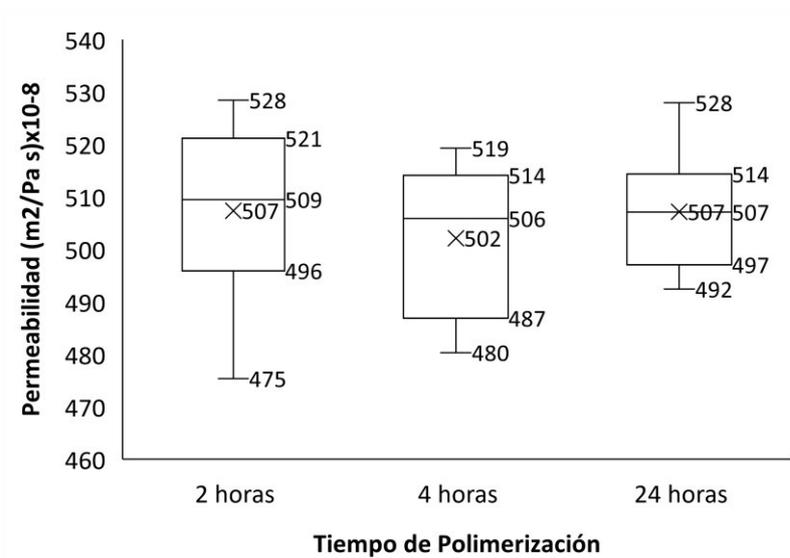


Figura 3.43. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-FA ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

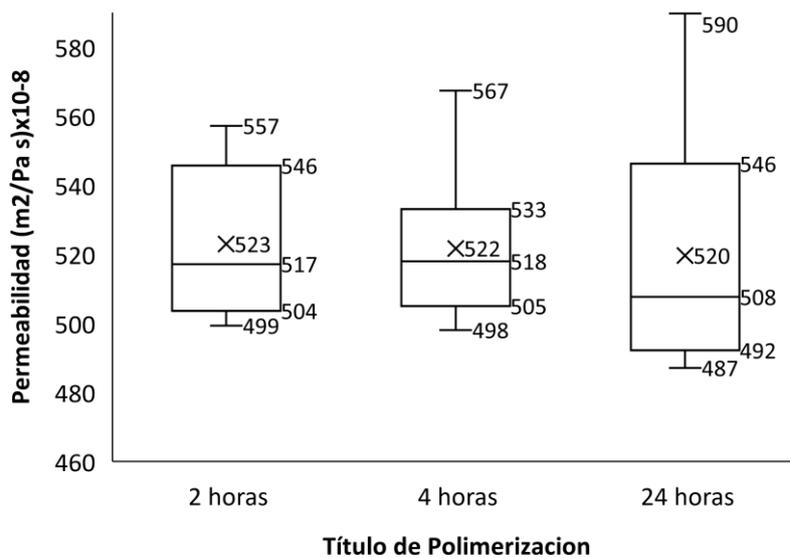


Figura 3.44. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sierra Central-FA ShengQuan 1,4%.  
(Fuente: Propia)

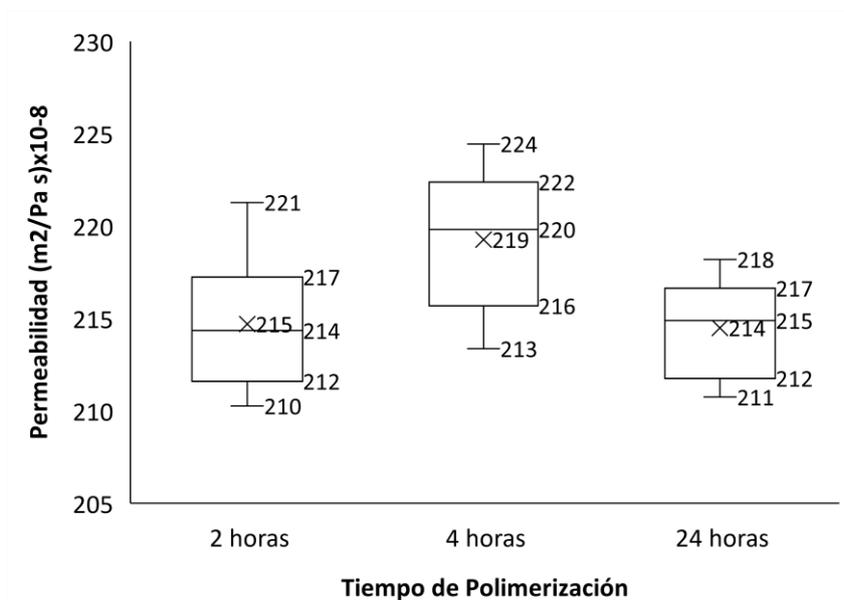


Figura 3.45. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-FA ShengQuan 1%.  
(Fuente: Propia)

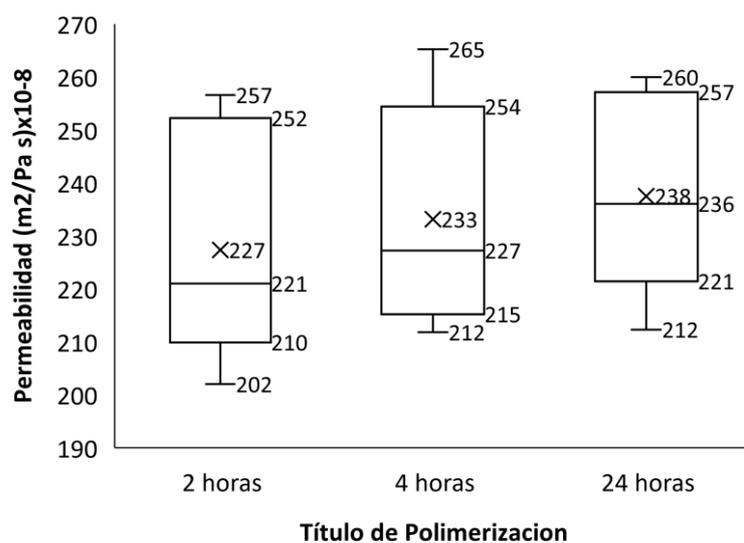


Figura 3.46. Diagrama de caja y bigotes de permeabilidad, arena de sílice Sibelco-FA ShengQuan 1,4%.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.25. Resumen de análisis de varianza ANOVA de un factor (tiempo) para comparar datos de permeabilidad a 2, 4 y 24 horas de polimerización de una misma mezcla de moldeo, análisis realizado con un valor de significancia  $\alpha=0.05$ .

Sistema de aglomerantes	Marca de aglomerantes	Marca de Arena	Cantidad de aglomerantes en porcentaje de arena	Probabilidad
PUNB	SQ	Sierra Central	1%	0,32
			1,40%	0,94
	SQ	Sibelco	1%	0,54
			1,40%	0,92
	SQ	Cast Ball	1%	0,82
			1,40%	0,96
Mancuso	Sierra Central	1%	0,24	
	Sibelco	1%	0,64	
	Cast Ball	1%	0,82	
FA	SQ	Sierra Central	1%	0,80
			1,40%	0,98
	SQ	Sibelco	1%	0,06
			1,40%	0,69
	SQ	Cast Ball	1%	0,76
		1,40%	0,88	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.25 se aprecia la probabilidad resultante del análisis ANOVA con el cual se acepta la primera hipótesis nula, es decir, no existe influencia del tiempo sobre la

permeabilidad, esta hipótesis nula se evaluó debido a que se quería comprobar si la permeabilidad de una mezcla de moldeo no varía como lo hace la resistencia a la tracción de la misma mezcla de moldeo (la resistencia aumenta a medida que aumenta el tiempo de polimerización).

Una vez determinada que la permeabilidad no varía en función del tiempo se calculó la permeabilidad promedio de cada mezcla de moldeo, estos resultados se pueden observar en la tabla 3.26.

Tabla 3.26. Permeabilidad promedio de todas las mezclas de moldeo ensayadas.

Sistema de aglomerantes	Marca de aglomerantes	Marca de Arena	Cantidad de aglomerantes en porcentaje de arena	Permeabilidad Promedio (m <sup>2</sup> /seg*Pa)x10 <sup>-8</sup>	
PUNB	SQ	Sierra Central	1%	384,61	
			1,40%	400,23	
	SQ	Sibelco	1%	162,06	
			1,40%	171,44	
	SQ	Cast Ball	1%	527,55	
			1,40%	542,94	
	Mancuso	Sierra Central	1%	408,78	
			Sibelco	1%	151,49
				Cast Ball	1%
	FA	SQ	Sierra Central	1%	505,55
1,40%				521,42	
SQ		Sibelco	1%	216,14	
			1,40%	232,64	
SQ		Cast Ball	1%	558,02	
			1,40%	550,18	

(Fuente: Propia)

Altos valores de permeabilidad se obtuvieron con corindón Cast Ball de índice AFS 51,46, seguido arena de sílice Sierra Central de índice AFS 39,63 y finalmente, los valores más bajos de permeabilidad se obtuvieron con arena de sílice Sibelco de índice AFS 61,50.

La permeabilidad es función del índice AFS, distribución granulométrica y forma de la arena de la siguiente manera: altos valores de permeabilidad se consiguen con bajos valores de índice AFS y viceversa, mientras más regular sea la forma de grano, la permeabilidad aumenta, debido a que formas regulares favorecen la libre circulación de aire a través de los granos de arena base y la distribución de grano afecta de tal manera que varios tamaños de grano en una misma arena base llenarán espacios pequeños o medianos entre granos grandes de arena, al llenar estos espacios los gases tendrán más dificultad para

pasar a través de ellos. Por tal razón se recomienda que el porcentaje de arena retenida sea de mínimo 70% en dos tamices para evitar la disminución de la permeabilidad. [6][11][40][27][9].

Una vez definido las variables que afectan la permeabilidad cabe destacar que los resultados obtenidos concuerdan con la teoría. La permeabilidad aumentaba a medida que el índice AFS disminuye y viceversa con arenas base de la misma forma (Arena de sílice Sierra Central índice AFS 39,63 y Arena de Sílice Sibelco índice AFS 61,50 de forma subangular).

Corindón Cast Ball tiene un índice AFS intermedio (AFS 51,46) entre arena de sílice Sierra Central y Sibelco, los valores de permeabilidad de mezclas de moldeo elaboradas con corindón son los más altos por que la forma redonda de sus granos promueve la fácil circulación de gases a través de la probeta de permeabilidad.

Es importante mencionar que la AFS no presenta valores base de permeabilidad para mezclas de moldeo aglomeradas químicamente, solo para mezclas de moldeo aglutinadas con arcillas (arena verde)[9][40]. Pero de acuerdo a diversos autores se recomienda una permeabilidad mínima para mezclas de moldeo aglomeradas químicamente de 100 a 150 (m<sup>2</sup>/seg\*Pa)x10<sup>-8</sup>[47][6][5][40]. Todas las mezclas de moldeo estudiadas en el presente trabajo cumplen con los valores mínimos de permeabilidad recomendada.

Las tablas 3.27, 3.28 y 3.29 muestran los resultados de la Prueba-T realizada para determinar si existe influencia de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad. La probabilidad resultante es mayor al nivel de significancia por lo tanto se acepta la hipótesis nula 2 que en este caso es: no existe influencia de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad.

Tabla 3.27. Probabilidad como resultado de Prueba-t con  $\alpha=0.05$  para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando corindón Cast Ball.

Tiempo de polimerización	Probabilidad resultante de mezclas de moldeo a comparar	
	PUNB SQ 1% y 1,4%	FA SQ 1% y 1,4%
2 horas	0,149	0,474
4 horas	0,104	0,415
24 horas	0,052	0,390

(Fuente: Propia)

Tabla 3.28. Probabilidad como resultado de Prueba-t con  $\alpha=0.05$  para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando arena de sílice Sibelco.

Tiempo de polimerización	Probabilidad resultante de mezclas de moldeo a comparar	
	PUNB SQ 1% y 1,4%	FA SQ 1% y 1,4%

2 horas	0,06	0,217
4 horas	0,203	0,170
24 horas	0,058	0,087

(Fuente: Propia)

Tabla 3.29. Probabilidad como resultado de Prueba-t con  $\alpha=0.05$  para determinar si existe efecto de la cantidad de aglomerante sobre la permeabilidad usando arena de sílice Sierra Central.

Tiempo de polimerización	Probabilidad resultante de mezclas de moldeo a comparar	
	PUNB SQ 1% y 1,4%	FA SQ 1% y 1,4%
2 horas	0,17	0,21
4 horas	0,14	0,13
24 horas	0,070	0,47

(Fuente: Propia)

### 3.2.3. Rugosidad

El ensayo de rugosidad se realizó en el laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela Politécnica Nacional donde se enviaron las probetas de permeabilidad de cada mezcla de moldeo (15 en total) para medir su rugosidad, el equipo usado fue un rugosímetro Elcometer 224/2 con sonda tipo P1. Se realizó 10 mediciones en cada espécimen, con dichos datos se realizó análisis ANOVA y T-test para evaluar las siguientes hipótesis nulas:

1. No existe influencia sobre la rugosidad cuando varía la arena base (hipótesis nula A); para la evaluación de esta hipótesis se eligieron datos donde se mantiene la marca, cantidad de aglomerantes y sistema de moldeo.
2. No existe influencia sobre la rugosidad cuando varía el sistema de moldeo (hipótesis nula B); para la evaluación de esta hipótesis se eligieron datos donde se mantiene la misma arena base, cantidad y marca de aglomerantes.
3. No existe influencia sobre la rugosidad cuando varía la cantidad de aglomerante (hipótesis nula C); para la evaluación de esta hipótesis se eligieron datos donde se mantiene el mismo tipo de arena base, marca y cantidad de aglomerante.
4. No existe influencia sobre la rugosidad cuando varía la marca de aglomerante (hipótesis nula D); para la evaluación de esta hipótesis se eligieron datos donde se mantiene el mismo tipo de arena base, tipo y cantidad de aglomerante.

Las gráficas 3.47, 3.48 y 3.49 fueron realizadas con los datos obtenidos del rugosímetro Elcometer 224/2 con sonda tipo P1, en las mismas se puede apreciar que la diferencia entre rugosidades de las distintas mezclas de moldeo no presentan diferencias significativas entre sí. Para evaluar las más claras diferencias como la influencia de la arena o sistema de moldeo sobre la rugosidad se evaluó las hipótesis nulas antes mencionadas.

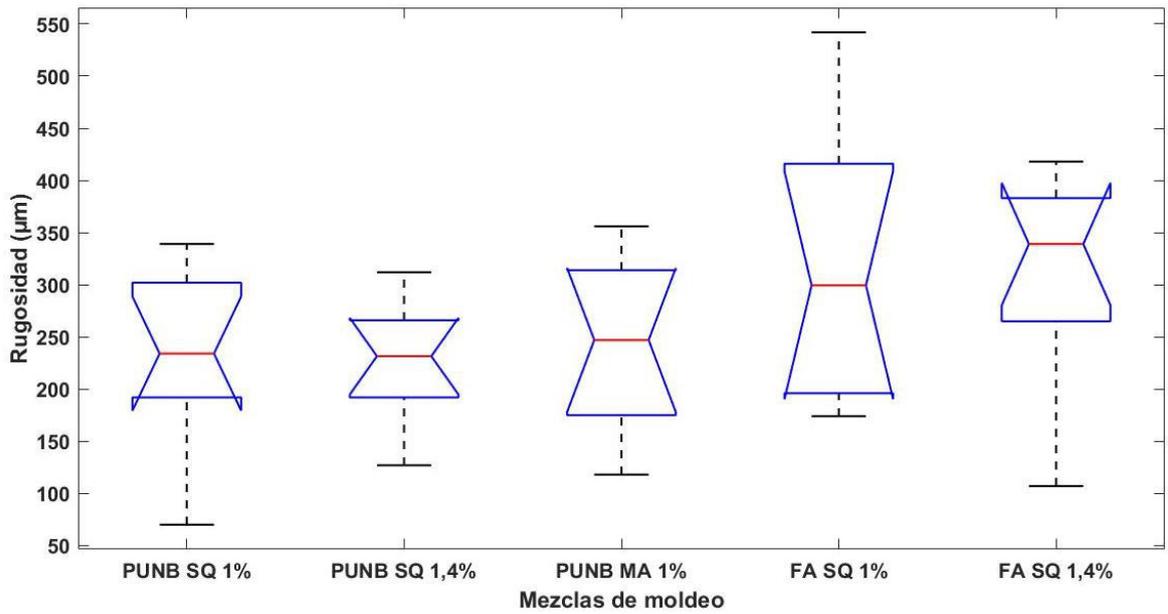


Figura 3.47. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con arena de silice Sierra Central.  
(Fuente: Propia)

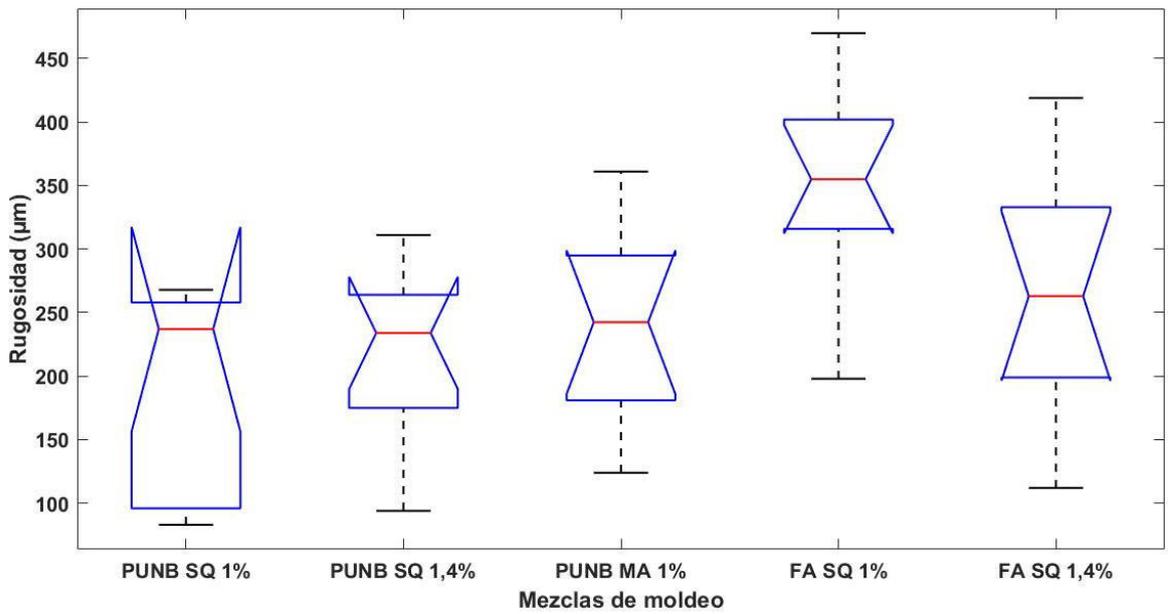


Figura 3.48. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con arena de silice Sibelco.  
(Fuente: Propia)

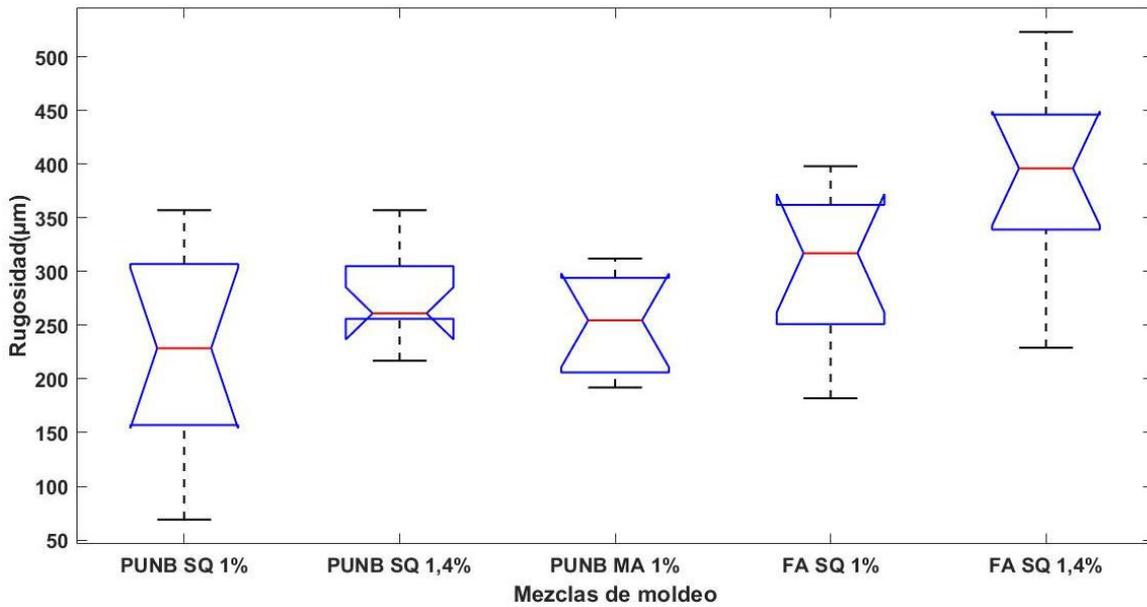


Figura 3.49. Resultados de rugosidad de mezclas de moldeo hechas con corindon Cast Ball. (Fuente: Propia)

Tabla 3.30. Probabilidad resultante de análisis ANOVA realizado con un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula A.

Sistema de moldeo y marca y cantidad de aglomerantes	Probabilidad resultante de análisis ANOVA
PUNB-SQ-1%	0,65
FA-SQ-1%	0,68

(Fuente: Propia)

De acuerdo a los resultados del análisis ANOVA muestra que no existe influencia del tipo de arena sobre la rugosidad.

Una vez determinado que no existe influencia del tipo de arena sobre la rugosidad se calculará la rugosidad promedio de las mezclas de moldeo ensayadas mostrada en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Rugosidad promedio de mezclas de moldeo.

Rugosidad (um)	
PUNB-SC-SQ1%	230,8
PUNB-SI-SQ1%	198,4
PUNB-CB-SQ1%	226
FA-SC-SQ1%	314,3
FA-SI-SQ1%	242,5
FA-CB-SQ1%	295,5

(Fuente: Propia)

Con el promedio se observa que existe una muy ligera diferencia entre la rugosidad de las mezclas de moldeo usando resina fenólico-uretano y resina furánica, estas pequeñas diferencias son fruto de variaciones estadísticas, por lo tanto, la rugosidad obtenida con los 3 tipos no varía.

Es importante destacar que el tipo de arena tiene un efecto significativo cuando el índice AFS tiene una alta variación entre una y otra arena base, en la industria de la fundición se trata de controlar el tamaño (Índice AFS) de la arena base dentro de un mismo rango, por lo tanto, todas las arenas base disponibles en el mercado tendrán niveles de rugosidad similares ya que todas ellas se encuentran dentro de un mismo rango de tamaños. Además, la calidad superficial de la mezcla de moldeo depende de la calidad superficial del modelo. [9][6][20]

La tabla 3.32 muestra los valores de probabilidad resultante de la Prueba T realizada para saber si existe afectación de la rugosidad cuando varía el sistema de moldeo (PUNB o FA) en este caso si existe una diferencia notable entre el sistema de moldeo PUNB (fenólico-uretano) y FA (resina furánica) para una misma arena base.

Se debe tomar en cuenta que dicha diferencia se da en *micras* (milésimas de milímetro) haciendo que para el caso práctico de fundición de metales esta diferencia sería imperceptible en la calidad superficial de piezas fundidas utilizando uno u otro sistema de moldeo.

Tabla 3.32. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula B.

Arena de Moldeo	Probabilidad resultante de Prueba T
	Se compara sistema PUNB y FA al 1% de cantidad de aglomerantes de marca SQ
Arena de sílice Sierra Central	0,010
Arena de sílice Sibelco	0,039
Corindón Cast Ball	0,00089

(Fuente: Propia)

La Tablas 3.33 y 3.34 muestran la probabilidad resultante de las Prueba-T realizadas, en ambos casos la probabilidad calculada es mayor al nivel de significancia usado ( $\alpha=0.05$ ) es decir, se aceptan las hipótesis nulas C y D. Por lo tanto, no existe influencia sobre la rugosidad cuando cambia la cantidad de aglomerantes ni tampoco existe influencia sobre la rugosidad cuando los aglomerantes son de diferentes marcas.

Tabla 3.33. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula C.

Arena Base	Probabilidad resultante de análisis T-Test	
	PUNB SQ 1% y 1,4%	FA SQ 1% y 1,4%
Arena de sílice Sierra Central	0,7751	0,9684
Arena de sílice Sibelco	0,5164	0,1008
Corindón Cast Ball	0,1338	0,0705

(Fuente: Propia)

Tabla 3.34. Probabilidad resultante de análisis Prueba-T realizado con un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ , evaluando la hipótesis nula D.

Arena base	Probabilidad resultante de Prueba-T
	1% PUNB Marca de aglomerantes ShengQuan y Mancuso
Arena de sílice Sierra Central	0,6753
Arena de sílice Sibelco	0,2334
Corindón Cast Ball	0,4597

(Fuente: Propia)

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

En el trabajo presente se ha logrado conseguir con satisfacción los objetivos específicos de determinar características y propiedades de las distintas arenas base y mezclas de moldeo resultantes aglomeradas químicamente.

El último objetivo no pudo ser completado debido al cambio de políticas de confidencialidad de la empresa relacionadas a los procesos de producción.

- La mezcla de moldeo (conjunto arena base-aglomerantes) es una parte vital del proceso de fundición de metales ya que la misma permite la elaboración de moldes con los cuales se puede obtener formas variadas de piezas fundidas.
- Existe en el mercado diferentes tipos de arenas base y distintos tipos de aglomerantes químicos cada uno con sus ventajas y desventajas para ser aplicados en distintos procesos de fundición de la función de tamaño, material, acabado o costo económico de la pieza fundida.
- El control continuo de arena base es de vital importancia porque una arena base con buenas características resulta en una mezcla de moldeo con buenas propiedades como: alta resistencia a la tracción, bajo consumo y alta afinidad de aglomerantes, buena permeabilidad, etc.
- Una arena base se considera apta para la elaboración de moldes de arena cuando su índice AFS varía entre 35 y 60, la distribución del tamaño de grano se considera uniforme cuando la cantidad de arena retenida en dos tamices está por encima de 70%.
- Altas cantidades de polvo fino presentes en la arena base son perjudiciales para la mezcla de moldeo, debido a que el polvo fino en altas cantidades consume el aglomerante reduciendo la resistencia de la mezcla de moldeo o requiriendo una mayor cantidad de catalizador para el endurecimiento de la mezcla de moldeo. Se debe mantener la cantidad de polvo fino por debajo de 1%.
- Granos regulares favorecen el bajo consumo de aglomerante para obtener una buena resistencia. Granos de formas regulares (redondos) tienen una elevada permeabilidad, formas poco regulares (subangulares) tienen permeabilidad media y granos irregulares (angulares) tienen la permeabilidad más baja.
- Un contenido de humedad relativamente alto en la arena base ralentiza o puede detener el curado o endurecimiento de la mezcla de moldeo. Una cantidad óptima

de contenido de humedad es menor a 0,2% para la correcta activación de aglomerantes.

- El pH de la arena base está relacionado con la cantidad y tipo de catalizador a usar, arenas alcalinas pueden consumir el catalizador ácido ralentizando o deteniendo el curado de la mezcla de moldeo, en cambio arenas ácidas pueden acelerar el proceso de curado que en ocasiones es tan rápido que no permite la elaboración de probetas o moldes.
- La arena de sílice Sibelco requirió 5% de catalizador rápido debido a su alta cantidad de polvo fino, en contraste corindón Cast Ball necesito 1% de catalizador lento o medio a pesar de tener una cantidad similar de polvo fino que la arena de sílice Sibelco.
- El LOI de la arena base cuando es nueva debe ser menor a 1%, por encima de este porcentaje demuestra una alta presencia de materiales orgánicos de menor punto de fusión que la arena base dando a conocer que la arena base no es ideal para el proceso de fundición.
- Los valores de resistencia a la tracción de las mezclas de moldeo ensayadas obedecen a una dispersión de datos en función de la cantidad y distribución de defectos presentes en la mezcla de moldeo.
- Las fuentes principales de defectos en las mezclas de moldeo son la presencia de fisuras en los granos de arena base y en la unión entre granos de arena por medio del aglomerante. La resistencia varía en función de la presencia y cantidad de dichos defectos.
- La resistencia más alta obtenida usando resina fenólico-uretano o sistema de moldeo PUNB se obtuvo con arena de sílice Sierra Central, 1,4% de cantidad de aglomerantes a 4 horas de tiempo de polimerización. En cambio, la resistencia más alta obtenida con sistema de moldeo con resina furánica o sistema de moldeo FA fue conseguida con arena de sílice Sierra Central, 1,4% de cantidad de aglomerantes a 4 horas de tiempo de polimerización con un valor de 0,63 (MPa). En ambos casos con una probabilidad de falla de 63%.
- La resistencia más elevada se obtuvo con arena de sílice Sierra Central de forma subangular en lugar de corindón Cast Ball debido a la presencia de polvo fino en corindón Cast Ball de forma redonda que disminuyo su resistencia obteniendo una resistencia similar a la de las mezclas de moldeo hechas con arena de sílice Sibelco de forma subangular y contenido de polvo fino similar a corindón Cast Ball.
- Todas las mezclas de moldeo estudiadas son aptas para algún proceso de fundición que variará dependiendo el tamaño o material de la pieza fundida

- La permeabilidad no varía en función del tiempo ni de la cantidad de aglomerantes, varía en función del índice AFS, distribución granulométrica y forma de la arena base altos valores de portabilidad se consiguen con bajos valores de índice AFS y viceversa.
- La rugosidad en las arenas base usadas en este proyecto no depende del tipo de arena base, este efecto se produce porque en el mercado de arenas base para mezclas de moldeo aglomeradas químicamente, durante el proceso de fabricación se trata de controlar dentro de un mismo número AFS y distribución de grano.
- El tipo de aglomerante usado (sistema de moldeo) afecta en la rugosidad. Esta diferencia se da en micras (milésimas de milímetro), pudiendo ser solo notadas con equipos de alta sensibilidad. En cambio, en el caso práctico de fundición sería imperceptible.
- La cantidad de aglomerante en una mezcla de moldeo (1% y 1,4%) y la marca de aglomerantes no afecta sobre la rugosidad de la mezcla de moldeo.
- Tomando en consideración que todas las arenas de este trabajo son aptas para el proceso de fundición y tomando en cuenta todos los parámetros evaluados, la mejor arena base es la arena de sílice Sierra Central, por su bajo porcentaje de polvo fino, buena distribución granulométrica, forma subangular, pH ligeramente alcalino, elevada resistencia y permeabilidad media

## 4.2. Recomendaciones

- El control continuo de arena es recomendable para cualquier proceso de fundición ya que de esta manera se puede controlar características como cantidad de polvo fino, LOI, forma de grano, entre otras. Que pueden disminuir la resistencia de la mezcla de moldeo o aumentar la presencia de gases provocando defectos en la pieza fundida.
- Antes de proceder con la elección de una nueva arena base es recomendable conocer las características de las distintas arenas base y realizar una comparación donde se evalué características como: cantidad de polvo fino, LOI, contenido de humedad, pH, forma de grano, resistencia a la tracción, permeabilidad, entre otras.
- El pH de la arena base está relacionado con la cantidad y tipo de catalizador a usar para formar una mezcla de moldeo, pero para conocer con más exactitud la afinidad de la arena base con distintos aglomerantes se recomienda realizar un ensayo llamando ADV o demanda acida.

- La presencia de defectos en los granos de arena base y mezcla de moldeo es innegable, por lo tanto, se recomienda realizar una investigación en la cual se trate de observar la forma de los defectos presentes en los granos de arena y mezcla de moldeo cuando varía el sistema de moldeo y determinar cuál de estos defectos tiene una influencia significativa sobre la variación de la resistencia.
- Una vez determinado que la variación de la resistencia de la mezcla de moldeo varía en función de la cantidad de defectos presentes en la mezcla de moldeo se recomienda para futuros análisis de mezclas de moldeo reportar el valor de resistencia en la cual la probabilidad de falla sea de 63%.
- Este estudio fue realizado para comprobar si existe influencia de los defectos presentes en los granos de arena y mezcla de moldeo de mezclas de moldeo aglomeradas químicamente, se recomienda extender el estudio a mezclas de moldeo hechas con aglutinantes como arcillas para conocer si la resistencia de dichas mezclas de moldeo varía en función de cantidad de defectos presentes.
- Al no tener valores base de permeabilidad de mezclas de moldeo aglomeradas químicamente dados por la AFS, se recomienda tomar como referencia valores de permeabilidad de otros estudios de mezclas de moldeo aglomeradas químicamente en los cuales se afirme que con dichos valores no se ha presentado ningún defecto relacionado con la mala evacuación de gases.
- La rugosidad no tiene un cambio significativo cuando se usa mezclas de moldeo con similar tamaño o índice AFS, se recomienda realizar un estudio para saber el efecto de la calidad superficial del molde sobre la mezcla de moldeo y luego sobre la pieza fundida.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. N. Villacís Tulcán, "Análisis de la conducta de mezclas de moldeo para fundición aglomeradas con resinas autofraguantes fenólico uretanas," p. 200, 2015.
- [2] F. Revelo, "Selección De La Mezcla De Moldeo Óptima Para Fundición De Aluminio Con El Uso De Modelos Gasificables," p. 163, 2011.
- [3] M. Martínez, "ESTUDIO DE LOS FACTORES DE ARENA DE MOLDEO UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DE PIEZAS FUNDIDAS DE ALUMINIO PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS ELABORADOS EN LOS LABORATORIOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.," 2016.

- [4] “Fundición de arena y los diferentes tipos de moldeo - Industrial Technologies SAS | INDUTECSA.” <https://www.indutecsa.com/index.php/noticias/31-fundicion-de-arena-y-los-diferentes-tipos-de-moldeo> (accessed Aug. 14, 2021).
- [5] E. Valdivieso and P. Lorena, “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS ARENAS Y SU INFLUENCIA EN LAS PIEZAS FUNDIDAS EN CIERTOS TALLERES DE FUNDICION DE LA CIUDAD DE QUITO,” 2018.
- [6] M. Holtzer and A. Kmita, *Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology*. 2020.
- [7] J. R. Brown, “Foseco Ferrous Foundryman ’ s Handbook Foseco Ferrous Foundryman ’ s Handbook Edited by,” pp. 1–352, 2000.
- [8] “Silica, Crystalline - Overview | Occupational Safety and Health Administration.” <https://www.osha.gov/silica-crystalline> (accessed Jun. 15, 2021).
- [9] L. Daňko, H. Mariusz, and G. R. Marcin, *Microstructure and properties of ductile and CGI casting*. 2015.
- [10] S. Ramrattan, “Non-standart tests for process control in chemically bonded sands.pdf.” .
- [11] H. Träger and A. Bührig-Polaczek, “Foundry Technology,” *Ullmann’s Encycl. Ind. Chem.*, 2000, doi: 10.1002/14356007.a12\_035.
- [12] J. Bernhard, “Dissertation Investigation on the removal of internal sand cores from aluminium castings Dipl . -Ing . Bernhard Johannes Stauder.”
- [13] M. W. Barsoum, “Fundamentals of ceramics,” *Fundam. Ceram.*, pp. 1–612, 2002, doi: 10.1887/0750309024.
- [14] AFS, “MOLD & CORE TEST HANDBOOK.” American Foundry Society, Schaumburg, 2015.
- [15] N. Titov and Y. Stepánov, “Tecnología Del Proceso De Fundicion.” p. 458, 1981.
- [16] G. Tenorio, “DESARROLLO DE UN AGLUTINANTE INORGÁNICO PARA LA PRODUCCIÓN DE CORAZONES DE ARENA EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ,” *Tesis*, p. 144, 2010.

- [17] A. Muciño and P. Santa, "Práctica 8. Granulometría de la arena," [Online]. Available: [http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/05/180515\\_Practica8\\_W\\_LMSE.pdf](http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/05/180515_Practica8_W_LMSE.pdf).
- [18] J. Acosta, L. Babativa, K. Herrera, and D. Peña, "Determinación de la distribución granulométrica y del contenido de los elementos de tamaño inferior a 0.02 mm por vía seca de una arena de moldeo, así como el cálculo del índice de finura AFS y la examinación de la forma de los granos de las arenas."
- [19] "Página 43 - Revista FUNDIPress 45." <https://www.pedeca.es/revistaonline/fundipress/45/files/assets/basic-html/page43.html> (accessed Mar. 10, 2021).
- [20] "Página 40 - Revista FUNDIPress 45." <https://pedeca.es/revistaonline/fundipress/45/files/assets/basic-html/page40.html> (accessed Jul. 18, 2021).
- [21] "Propiedades de las arenas de moldeo." <https://es.slideshare.net/santamariabarajasyenni/propiedades-de-las-arenas-de-moldeo> (accessed Mar. 10, 2021).
- [22] O. Castillo, "Caracterización de las tierras de moldeo del porvenir de la provincia de Sullana," 2011.
- [23] Stephen D. Chastain, "Metal Casting A Sand Casting.pdf." 2004.
- [24] "Poliuretanos." <https://pslc.ws/spanish/urethane.htm> (accessed Jul. 03, 2021).
- [25] G. Barona López, J. Guilcamaigua Padilla, M. Albarracín Álvarez, and E. Velasteguí López, "Arenas De Moldeo Aglomeradas Con Resinas: Orgánicas Sintéticas, Inorgánicas Y Orgánicas Naturales Biopolímeros, Aplicadas En La Industria Automotriz," *Cienc. Digit.*, vol. 2, no. 3, pp. 619–641, 2018, doi: 10.33262/cienciadigital.v2i3.178.
- [26] C. W. Ammen, "The complete handbook of sand casting," p. 238, 1979.
- [27] Y. lei Li, G. hua Wu, W. cai Liu, A. tao Chen, L. Zhang, and Y. xin Wang, "Effect of reclaimed sand additions on mechanical properties and fracture behavior of furan no-bake resin sand," *China Foundry*, vol. 14, no. 2, pp. 128–137, 2017, doi: 10.1007/s41230-017-6024-3.

- [28] “Spartan Series IV | Sand Mixing | Foundry Equipment | OFML.” <https://www.ofml.net/equipment/sand-mixing/omega-400> (accessed Jul. 04, 2021).
- [29] “Mezcladora de Laboratorio - Pruebas en Laboratorio - Utest Material Testing Equipment.” <https://www.utest.com.tr/es/25735/Mezcladora-de-Laboratorio> (accessed Jul. 04, 2021).
- [30] “Equipo de prueba de mezclador de arena de resina SHY - WUXI CTD IMPORT AND EXPORT CO., LTD.” [https://wuxictd.en.ecplaza.net/products/shy-resin-sand-mixer-testing-equipment\\_2848755](https://wuxictd.en.ecplaza.net/products/shy-resin-sand-mixer-testing-equipment_2848755) (accessed Aug. 14, 2021).
- [31] “Cálculo de los Parámetros de la Distribución de Weibull - Reliabilityweb: A Culture of Reliability.” <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/calculo-de-los-parametros-de-la-distribucion-de-weibull> (accessed Jul. 04, 2021).
- [32] A. Sharma and D. Penumadu, “Role of particle shape in determining tensile strength and energy release in diametrical compression of natural silica grains,” *Soils Found.*, vol. 60, no. 5, pp. 1299–1311, 2020, doi: 10.1016/j.sandf.2020.08.004.
- [33] X. Zhang, B. A. Baudet, and T. Yao, “The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility,” *Int. J. Geo-Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 4–13, 2020, doi: 10.1186/s40703-020-0108-4.
- [34] G. McDowell and A. Amon, “The application of Weibull statistics to the fractura of soil particles,” *Chem. Pharm. Bull.*, vol. 40, no. 6, pp. 1569–1572, 1992.
- [35] “Clasificación de los granos de arena en base a su morfología externa. | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Clasificacion-de-los-granos-de-arena-en-base-a-su-morfologia-externa\\_fig4\\_28204915](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Clasificacion-de-los-granos-de-arena-en-base-a-su-morfologia-externa_fig4_28204915) (accessed Apr. 14, 2021).
- [36] R. Bisbal, F. Gómez, C. Di Yorio, and M. Pérez, “Evaluación de las características y propiedades de fundición de Arena de Olivino Venezolana (Parte I),” *Rev. la Fac. Ing. Univ. Cent. Venez.*, vol. 30, no. 3, pp. 95–110, 2015.
- [37] “Ensayo loi y materias volatiles - Ensayos universitarios - 2589 Palabras.” <https://www.buenastareas.com/ensayos/Ensayo-Loi-y-Materias-Volatiles/2078842.html> (accessed Sep. 02, 2021).
- [38] L&DD, “SHY Resin Sand Mixer Operation Manual.”

- [39] L&DD, "SAH Resin Sand Sample Making Machine." pp. 1–6.
- [40] Aminnudin, Y. R. A. Pradana, and A. Ariono, "Effect grain size of sand to mould's permeability & compressive strength, and casting products," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1700, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1700/1/012042.
- [41] L&DD, "Operation Manual SWY Sand Strength Testing Machine," no. D, pp. 0–1.
- [42] T. P. Sample and P. Air, "Operation Manual STZ Permeability Tester," pp. 0–5.
- [43] D. Valdez and E. Nagy, *Phenolic Resins: A Century of Progress*. 2010.
- [44] "Escala del pH - Experimentoscientificos.es." <https://www.experimentoscientificos.es/ph/escala-del-ph/> (accessed Sep. 16, 2021).
- [45] F. Chen, "¿Cuántas muestras de un material deben realizarse en una prueba de tracción para obtener un buen resultado de límite elástico y otros valores? - Quora." <https://www.quora.com/How-many-samples-of-a-material-should-be-done-on-a-tensile-test-to-get-a-good-result-of-yield-strength-and-other-values#ciulu> (accessed Aug. 16, 2021).
- [46] Petrus *et al.*, "THE IMPACT of COMPOSITION and the DENSIFICATION LEVEL of FURAN MOLDING COMPOUNDS on the STRENGTH of LARGE-SIZE CASTING MOLDS," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 65, no. 4, pp. 1431–1436, 2020, doi: 10.24425/amm.2020.133710.
- [47] D. Padilla, V. Vega, M. Tabuchi, and R. Gonzales, "Influencia Del Molde Y El Tratamiento Térmico En Las Propiedades Del Bronce-Aluminio," *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, vol. 7, no. 14, pp. 23–32, 2004.