

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

Tema: “Análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y su influencia en la resistencia al desgaste superficial”

Trabajo de investigación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magíster en Diseño Mecánico

Autor: Ing. Jorge Alejandro Paredes Zumbana

Director: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

Ambato - Ecuador

Septiembre – 2017

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

El tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ing. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, Mg., e integrado por los señores: Ing. Christian Byron Castro Miniguano, Mg., Ing. Gustavo David Patín Manobanda, Mg., e Ing. Cristian Fabián Pérez Salinas, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y su influencia en la resistencia al desgaste superficial”, elaborado y presentado por el señor: Ing. Jorge Alejandro Paredes Zumbana, para optar por el Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Segundo Francisco Pazmiño Gavilanes, Mg.
Presidente del Tribunal

Ing. Christian Byron Castro Miniguano, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Gustavo David Patín Manobanda, Mg.
Miembro del Tribunal

Ing. Cristian Fabián Pérez Salinas, Mg.
Miembro del Tribunal

AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación presentado con el tema “Análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y su influencia en la resistencia al desgaste superficial”, le corresponde exclusivamente al: Ingeniero Jorge Alexandro Paredes Zumbana, Autor bajo la Dirección del Ingeniero Segundo Manuel Espín Lagos, Mg., Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Jorge Alexandro Paredes Zumbana

c.c. 180373207-0

AUTOR

Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

c.c. 050150077-1

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Jorge Alejandro Paredes Zumbana
c.c. 180373207-0

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por darme la sabiduría, fortaleza y salud para cumplir las metas que me propongo.

A mi Padre Marcelo Paredes quien en vida inculcó en mí el carácter de siempre superarse como persona, padre de familia y profesionalmente, y ahora desde el Cielo brindándome su fortaleza para seguir adelante.

A las autoridades y profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la UTA, por su aporte de conocimientos brindado en esta etapa de estudios.

DEDICATORIA

Este Trabajo de Investigación se lo dedico a mi Padre Marcelo Paredes por el cuidado y amor que me brindó siempre y la fortaleza que ahora me transmite desde el Cielo, a mi esposa Mercy mi compañera de toda la vida que con su amor demostrado cada día me hace sentir su apoyo incondicional, a mi hija Valentina el mayor de mis tesoros por el amor y la fuerza que me da para seguir adelante y cumplir mis metas.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

TÍTULO	I
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	III
DERECHOS DE AUTOR	IV
AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS GRÁFICOS Y TABLAS	XI
RESUMEN EJECUTIVO	XXI

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.- TEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2.1.- CONTEXTUALIZACIÓN	1
1.2.2.- ANÁLISIS CRÍTICO.....	2
1.2.3.- PROGNOSIS.....	3
1.2.4.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.2.5.- PREGUNTAS DIRECTRICES	3
1.2.6.- DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2.6.1.- DELIMITACIÓN DE CONTENIDOS.....	4
1.2.6.2.- DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	4
1.2.6.3.- DELIMITACIÓN TEMPORAL	4
1.3.- JUSTIFICACIÓN	5
1.4.- OBJETIVOS	6
1.4.1.- OBJETIVO GENERAL	6
1.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	7
2.1.1.- ANTECEDENTES.....	7
2.1.2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	9
2.1.2.1.- Tren de molienda de un ingenio azucarero	9
2.1.2.2.- Desgaste de los metales.....	15
2.1.2.3.- Propiedades del material	25
2.1.2.4.- Norma ASTM G-65 para desgaste abrasivo	32
2.1.2.5.- Corrosión de los metales	33
2.1.2.6.- Norma ASTM B-117 para ensayo de corrosión.....	38
2.1.2.7.- Técnica de proyección térmica.....	39
2.1.2.8.- Preparación de la superficie	43
2.2.- FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA	44
2.3.- FUNDAMENTACIÓN LEGAL.....	44
2.4.- CATEGORIAS FUNDAMENTALES	45
2.5.- HIPÓTESIS.....	45
2.6.- SEÑALAMIENTO DE VARIABLES.....	46
2.6.1.- VARIABLE INDEPENDIENTE	46
2.6.2.- VARIABLE DEPENDIENTE	46
2.6.3.- TÉRMINO DE RELACIÓN.....	46

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.- ENFOQUE	47
3.2.- MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
3.2.1.- De campo	47
3.2.2.- Bibliográfico	47

3.2.3.- Experimental	48
3.3.- NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	48
3.3.1.- Exploratoria.....	48
3.3.2.- Descriptiva	48
3.3.3.- Asociación de variables.....	49
3.4.- POBLACIÓN Y MUESTRA.....	49
3.4.1.- Población.....	49
3.4.2.- Muestra.....	49
3.5.- OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	51
3.5.1.- Variable independiente.....	51
3.5.2.- Variable dependiente.....	51
3.6.- RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	53
3.7.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	53

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	54
4.1.1.- PROCESO DE OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	54
4.2.- PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	54
4.2.1.- EXTRACCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS.....	55
4.2.2.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE	57
4.2.3.- MEDICIONES DE RUGOSIDAD	62
4.2.4.- MEDICIONES DE DUREZA INICIAL BRINELL.....	64
4.2.5.- BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA	67
4.2.6.- MEDICIÓN DE DUREZA BRINELL FINAL.....	71
4.2.7.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE BLINDAJE	72
4.2.8.- MEDICIÓN DE PESOS ANTES DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE ABRASIVO Y CORROSIVO.....	74
4.2.9.- ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO SEGÚN ASTM G-65.....	75

4.2.10.- MEDICIÓN DE PESOS DESPUÉS DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO	83
4.2.11.- CÁLCULOS DE PÉRDIDA DE VOLUMEN	84
4.2.12.- IDENTIFICACIÓN METALOGRÁFICA DEL ACERO AISI 1045	85
4.2.13.- ENSAYO DE CORROSIÓN EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA.....	88
4.3.- INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	95
4.3.1.- ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD	95
4.3.2.- ANÁLISIS DE LA DUREZA.....	99
4.3.3.- ANÁLISIS DEL ESPESOR DE BLINDAJE	100
4.3.4.- ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO	101
4.3.5.- ANÁLISIS DE LA METALOGRAFÍA DEL SUSTRATO Y DEL BLINDAJE ..	106
4.3.5.1.- SUSTRATO	106
4.3.5.2.- MATERIAL DE BLINDAJE.....	110
4.3.6.- ANÁLISIS DE LA HUELLA DE DESGASTE	112
4.3.7.- ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN EN LOS ENSAYOS DE NIEBLA SALINA ..	114
4.4.- VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	118

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- CONCLUSIONES	124
5.2.- RECOMENDACIONES	127

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1.- DATOS INFORMATIVOS	130
6.2.- ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA	131
6.3.- JUSTIFICACIÓN	132

6.4. - OBJETIVOS	133
6.4.1.- OBJETIVO GENERAL	133
6.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	133
6.5.- ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD	134
6.6.- FUNDAMENTACIÓN	134
6.7.- METODOLOGÍA	134
6.7.1.- PREPARACIÓN SUPERFICIAL Y RUGOSIDAD	135
6.7.2.- CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN TÉRMICA.	138
6.7.3.- PRECALENTAMIENTO SUPERFICIAL.....	139
6.7.4.- PROCESO DE BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA	139
6.7.5.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE BLINDAJE	141
6.7.6.- MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL BLINDAJE	142
6.7.7.- CARACTERIZACIÓN DEL BLINDAJE	142
6.7.8.- ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DEL BLINDAJE	144
6.7.9.1.- DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	147
6.7.9.2.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE WEIBULL PARA EL BLINDAJE	151
6.7.10.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	154
6.8.- ADMINISTRACIÓN	155
6.9.- PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN	156
7.- BIBLIOGRAFÍA.....	157
ANEXOS	159

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1. Tren de molienda del ingenio azucarero San Juan.....	9
Figura 2. 2. Componentes de un molino que permiten la extracción de jugo del bagazo	10
Figura 2. 3. Virador o cuchilla central de un molino de caña.....	10

Figura 2. 4. Sistema de presión hidráulica.....	11
Figura 2. 5. Fuerzas directas que actúan sobre la masa superior.....	12
Figura 2. 6. Polígono de fuerzas para la resolución de fuerzas en un molino	12
Figura 2. 7. Efecto de la reacción del virador o cuchilla central en la presión hidráulica....	13
Figura 2. 8. Desgaste del virador en canales (vista superior)	14
Figura 2. 9. Huellas de desgaste del virador del molino 1 (vista superior)	14
Figura 2. 10. Desgaste adhesivo	17
Figura 2. 11. Desgaste abrasivo.....	17
Figura 2. 12. Desgaste por fatiga superficial	18
Figura 2. 13. Desgaste corrosivo o químico	18
Figura 2. 14. Desgaste por impacto	19
Figura 2. 15. Desgaste por cavitación.....	19
Figura 2. 16. Desgaste por abrasión a) de dos cuerpos, b) de tres cuerpos	20
Figura 2. 17. Tipos de desgaste abrasivo según el nivel de daño sufrido.....	21
Figura 2. 18. Mecanismos de desgaste por abrasión	22
Figura 2. 19. Esencia del desgaste por abrasión	23
Figura 2. 20. Resistencia al desgaste vs dureza del material	26
Figura 2. 21. Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción para el acero, latón y fundición.....	28
Figura 2. 22. Aparato para ensayos de desgaste abrasivo con rueda de caucho y arena seca	33
Figura 2. 23. Tipos comunes de corrosión.....	34
Figura 2. 24. Arreglo de los colectores de niebla	39
Figura 2. 25. Capa rociada termicamente	40
Figura 2. 26. Componentes de la técnica de proyección térmica	41
Figura 2. 27. Equipo de proyección térmica por llama y polvos.....	42

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1. Extracción de muestras de acero AISI 1045 de un virador de molino de caña para la fabricación de probetas	55
--	----

Figura 4. 2. Fabricación de probetas mediante el uso de: a) Sierra eléctrica de vaivén, b) Sierra manual.....	56
Figura 4. 3. Geometría de probetas: a) Para ensayo de abrasión, b) Para ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina.....	56
Figura 4. 4. a) Discos abrasivos de grano de circonio 120, b) Pulido mecánico de probetas	58
Figura 4. 5. Probetas para ensayo de desgaste por abrasión preparadas superficialmente mediante pulido mecánico.....	58
Figura 4. 6. a) Perforado y machuelado de probetas para anclaje posterior, b) Probetas sujetas en placa previo al sandblasting.....	59
Figura 4. 7. a) Compresor de aire modelo CPS-185, b) Tolda de alimentación de material abrasivo.....	59
Figura 4. 8. Morfología del abrasivo mineral y propiedades físico-químicas (ANEXO B1)	60
Figura 4. 9. Proceso de sandblasting mineral en probetas.....	60
Figura 4. 10. Probetas con preparación superficial por sandblasting para ensayo de desgaste por abrasión	61
Figura 4. 11. Composición química del abrasivo metálico y morfología (ANEXO B2)	61
Figura 4. 12. Proceso de granallado metálico en probetas	62
Figura 4. 13. Probetas con preparación superficial de granallado metálico para ensayo de desgaste abrasivo	62
Figura 4. 14. Calibración del medidor de rugosidad ELCOMETER 123 sobre un patrón de vidrio de rugosidad cero	63
Figura 4. 15. Mediciones de rugosidad en probetas con diferente preparación superficial: a) Pulido mecánico, b) Sandblasting mineral, c) Granallado metálico.....	63
Figura 4. 16. Equipo profesional de medición de dureza DIGIMESS DP 300	65
Figura 4. 17. Calibración del equipo de medición de dureza DIGIMESS DP 300. El patrón indica una dureza de 797.4 HL±5, la medida tomada muestra 799 HL	65
Figura 4. 18. Registro de dureza Brinell en probetas	66
Figura 4. 19. Presiones de trabajo establecidas para los gases, oxígeno y acetileno en el equipo de proyección térmica SUPERJET-S EUTALLOY	67

Figura 4. 20. Configuración de la presión de gases para el proceso de proyección térmica, acetileno a 9 PSI y oxígeno a 37 PSI.....	67
Figura 4. 21. Propiedades físico-químicas de la aleación micropulverizada EUTALLOY 11496 (ANEXO B3).....	68
Figura 4. 22. Control de temperatura de precalentamiento en la superficie de las probetas mediante el uso de un termómetro láser FLUKE 62MAX+.....	69
Figura 4. 23. La temperatura de precalentamiento (200°C) en la probeta no fue suficiente para conseguir la adherencia del metal de aporte con la superficie.....	69
Figura 4. 24. La adherencia del metal pulverizado en la superficie de la probeta por proyección térmica se dio a temperaturas de 320°C y 420°C	70
Figura 4. 25. Blindaje de probetas por proyección térmica de aleación metálica micro pulverizada EUTALLOY 11496	70
Figura 4. 26. Registro de dureza Brinell en probetas después del proceso de blindaje.....	71
Figura 4. 27. Medidor de espesores por ultrasonido DEMEQ QS5	72
Figura 4. 28. Calibración del medidor de espesores por ultrasonido DEMEQ QS5	73
Figura 4. 29. Medición de espesor de blindaje en probetas.....	73
Figura 4. 30. Registro de pesos de probetas en balanza de precisión ADAM, antes de los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada	74
Figura 4. 31. Equipo para granulometría WS TYLER RX-812 según ASTM E-11	76
Figura 4. 32. Algunas propiedades físico-químicas de la arena de sílice (ANEXO B4).....	77
Figura 4. 33. Análisis de granulometría en equipo WS TYLER RX-812 según ASTM E11. a) Pesaje de 100 g de muestra, b) pesaje de tamices vacíos, c) vibración de muestra durante 20 min, d) pesaje de tamices con el producto retenido.....	78
Figura 4. 34. Equipo de medición de balance de humedad SHIMADZU MOC-120H.....	79
Figura 4. 35. Proceso de medición de humedad. a) Calibración en cero del equipo, b) pesaje de muestra, c) registro del valor de humedad.....	79
Figura 4. 36. Proceso de regulación del flujo de arena de sílice. a) Ubicación de la boquilla, b) Flujo en forma de cortina, c) Recolección de muestra de arena durante 1 min, d) Pesaje de muestra.....	81
Figura 4. 37. Ensayo de desgaste por abrasión según el procedimiento B de la ASTM G-65	82

Figura 4. 38. Probetas ensayas a desgaste por abrasión. a) De acero AISI 1045 sin blindaje, b) De acero AISI 1045 con preparación superficial de pulido y con blindaje, c) De acero AISI 1045 con preparación superficial de sandblasting mineral y con blindaje, d) De acero AISI 1045 con preparación superficial de granallado metálico y con blindaje	83
Figura 4. 39. Pesaje de probetas después del ensayo de desgaste por abrasión, con precisión 0.001 g, en balanza de precisión ADAM.....	83
Figura 4. 40. Análisis metalográfico del acero AISI 1045. a) Prensado de probeta en bakelita, b) Lijado manual en lijas 240, 320, 400, 600 y 1500, c) Pulido mecánico en paño a 150 rpm, d) Ataque químico con Nital 2, e) Enjuague en agua de probeta, d) Secado de probeta, g) Análisis en microscopio	86
Figura 4. 41. Materiales para análisis metalográfico. a) Muestras de acero AISI 1045 prensado en bakelita, b) Bakelita en gránulos, c) Nital 2 para ataque químico.....	87
Figura 4. 42. Imagen tomada a 100X de la muestra de acero AISI 1045, con reactivo Nital 2 y tiempo de ataque 5 segundos	87
Figura 4. 43. Resultados del análisis metalográfico del acero AISI 1045, en él se indica 62.2% de perlita y 37.8% de ferrita	88
Figura 4. 44. Cámara de niebla salina de la EPN para ensayos de corrosión acelerada.....	89
Figura 4. 45. Ubicación de las probetas dentro de la cámara de niebla salina y configuración del panel.....	89
Figura 4. 46. Probetas extraídas de la cámara de niebla salina sin limpieza	90
Figura 4. 47. Probetas después de la limpieza para eliminar residuos salinos y suciedad ...	90
Figura 4. 48. Grupos de probetas después de los ensayos de corrosión acelerada, a) permanencia 200 horas, b) permanencia 100 horas.....	91
Figura 4. 49. Inspección visual del tipo de corrosión, a) lámpara magnificadora RT-202, b) Inspección de sustratos, c) corrosión uniforme presente en sustratos	93
Figura 4. 50. a) Limpieza de corrosión uniforme en sustrato a 200h, b) Medición del tamaño de grietas en probeta con blindaje, c) Pesaje de probetas con precisión 4 dígitos...	93
Figura 4. 51. Representación de la rugosidad en probetas según el acabado superficial	95
Figura 4. 52. Perfil de acabado superficial por sandblasting (Microscopia a 100X)	96
Figura 4. 53. Vista frontal de la superficie de la probeta preparada por sandblasting, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X	96

Figura 4. 54. Perfil de acabado superficial por granallado metálico (Microscopia a 100X)	97
Figura 4. 55. Vista frontal de la superficie preparada por granallado metálico, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X	97
Figura 4. 56. Perfil de acabado superficial por pulido mecánico (Microscopia a 100X)	98
Figura 4. 57. Vista frontal de la superficie preparada por pulido mecánico, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X	98
Figura 4. 58. Representación de la dureza antes y después del blindaje	99
Figura 4. 59. Representación del espesor de blindaje con EUTALLOY 11496 por proyección térmica	100
Figura 4. 60. Zona de frontera entre sustrato y material de blindaje (Microscopia a 100X)	101
Figura 4. 61. Representación de la pérdida de volumen en el ensayo de desgaste abrasivo	102
Figura 4. 62. Representación del coeficiente de variación para el ensayo de desgaste abrasivo	103
Figura 4. 63. Representación del coeficiente de desgaste abrasivo	104
Figura 4. 64. Representación de la pérdida de volumen contra la dureza del material	105
Figura 4. 65. Representación del incremento de dureza y resistencia al desgaste del material	106
Figura 4. 66. Porcentajes de perlita y ferrita presentes en el acero AISI 1045 según el software	107
Figura 4. 67. Aleación metálica micropulverizada EUTALLOY 11496 distribuida en superficie de acero AISI 1045, microscopía a 200X	111
Figura 4. 68. Aparición de defectos en el blindaje, microscopía tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X	111
Figura 4. 69. Nidos de poros presentes en el blindaje, imagen a 100X	112
Figura 4. 70. Huella de desgaste abrasivo en el sustrato, imagen microscópica a 100X	112
Figura 4. 71. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por pulido mecánico, imagen microscópica a 100X	113
Figura 4. 72. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por sandblasting, imagen microscópica a 100X	113

Figura 4. 73. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por granallado metálico, imagen microscópica a 100X.....	114
Figura 4. 74. Representación de la velocidad de corrosión en probetas expuestas a 100 horas en la cámara de niebla salina	115
Figura 4. 75. Probetas expuestas a 100h de corrosión acelerada, a) Corrosión por grietas en probeta C14, b) Corrosión uniforme en sustrato	115
Figura 4. 76. Representación de la velocidad de corrosión en probetas expuestas a 200 horas en la cámara de niebla salina	116
Figura 4. 77. Probetas expuestas a 200h de corrosión acelerada, a) Corrosión por grietas en el borde de probeta C8, b) Corrosión uniforme en sustrato.....	116
Figura 4. 78. Probetas expuestas a corrosión acelerada en cámara de niebla salina, a) Probeta sin corrosión en blindaje expuesta a 200h, b) Probeta sin corrosión en blindaje expuesta a 100h, c) Sustrato con corrosión uniforme expuesto a 200h, d) Sustrato con corrosión uniforme expuesto a 100h	117
Figura 4. 79. Valores de cuantiles de la distribución T-student	120
Figura 4. 80. Representación gráfica del valor crítico (t) y el valor estadístico calculado (t) en la zona de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0	120
Figura 4. 81. Representación gráfica del valor crítico (t) y el valor estadístico calculado (t) en las áreas de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0	123

CAPÍTULO 6

Figura 6. 1. Material abrasivo mineral VITECAL para sandblasting	135
Figura 6. 2. Alimentación de material abrasivo en tolva de equipo sandblasting	136
Figura 6. 3. Flancos de los dientes del virador después del sandblasting.....	136
Figura 6. 4. Medición de la rugosidad en los flancos de los dientes del virador.....	137
Figura 6. 5. Tipos de boquillas y presiones de trabajo establecidas para los gases, oxígeno y acetileno.....	138
Figura 6. 6. Presiones configuradas para los gases, oxígeno y acetileno	138
Figura 6. 7. Pre calentamiento de los flancos de los dientes del virador, con un control de temperatura entre 320 y 420°C	139

Figura 6. 8. Aplicación del blindaje en los flancos de los dientes del virador	140
Figura 6. 9. Medición de espesor en los flancos de los dientes del virador, a) calibración en cero del equipo, b) medición antes del blindaje, c) medición después del blindaje	141
Figura 6. 10. Medición de dureza brinell en blindaje, a) Calibración del equipo, b) Registro de dureza brinell	142
Figura 6. 11. Material de blindaje distribuido de manera uniforme en la superficie, imagen microscópica a 200X	143
Figura 6. 12. Corrosión por grietas debido a la acumulación de sustancias salinas en el blindaje	143
Figura 6. 13. Modelado en software de los flancos de los dientes del virador del molino de caña.....	145
Figura 6. 14. Gestor de propiedades mecánicas del software que indica la masa de los flancos de los dientes del virador	146
Figura 6. 15. Curva de flujo de fallas o curva de la bañera	148
Figura 6. 16. Función de densidad de la distribución de Weibull mostrando el efecto del sesgo del parámetro de forma β	149
Figura 6. 17. Degradación del material de los dientes del virador después de 120 días de zafra, a) flanco de diente despostillado, b) desprendimiento total del diente.....	151
Figura 6. 18. Función de confiabilidad de Weibull para el blindaje	153
Figura 6. 19. Función de densidad de probabilidad de tasa de falla para el blindaje	153

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1. Escalas de dureza Rockwell.	27
Tabla 2. 2. Procedimiento para ensayos de desgaste abrasivo.	32

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1. Muestra de probetas.....	50
--------------------------------------	----

CAPÍTULO 4

Tabla 4. 1. Valores de rugosidad en las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, según la preparación superficial.....	64
Tabla 4. 2. Valores de dureza Brinell de las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, previo al proceso de blindaje.	66
Tabla 4. 3. Valores de dureza Brinell de las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, después del proceso de blindaje.	71
Tabla 4. 4. Valores de espesor de blindaje en probetas para ensayo de desgaste por abrasión.....	73
Tabla 4. 5. Valores de peso en probetas antes de los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada.	75
Tabla 4. 6. Parámetros de control de la máquina para ensayos de desgaste por abrasión.	76
Tabla 4. 7. Intervalos de tamaño de partículas de la muestra de arena de sílice.	78
Tabla 4. 8. Valores de humedad de la arena de sílice.....	80
Tabla 4. 9. Valores de flujo de la arena de sílice.....	81
Tabla 4. 10. Valores de peso de probetas después del ensayo de desgaste por abrasión.	84
Tabla 4. 11. Resultados de los ensayos de desgaste abrasivo.....	85
Tabla 4. 12. Parámetros técnicos de la cámara de niebla salina.	88
Tabla 4. 13. Tipos de corrosión presentes en las probetas después del ensayo en la cámara de niebla salina.	92
Tabla 4. 14. Tasas o velocidades de corrosión calculadas.....	94
Tabla 4. 15. Pesos antes y después del ensayo de desgaste abrasivo en probetas con blindaje	119
Tabla 4. 16. Resultados de la prueba T-student para la verificación de la hipótesis de acuerdo a los pesos inicial y final en el desgaste por abrasión.....	119

Tabla 4. 17. Pesos antes y después del ensayo de corrosión acelerada en probetas con blindaje	122
Tabla 4. 18. Resultados de la prueba T-student para la verificación de la hipótesis de acuerdo a los pesos inicial y final en el desgaste por corrosión acelerada	122

CAPÍTULO 6

Tabla 6. 1. Valores de perfil de superficie según la norma NACE RP0287-2002.	137
Tabla 6. 2. Valores de la masa de los flancos de los dientes según el espesor modelado ..	146
Tabla 6. 3. Valores de vida útil del blindaje según el espesor	147
Tabla 6. 4. Cálculo de variables para determinar la confiabilidad del blindaje	152
Tabla 6. 5. Valores calculados de la confiabilidad y probabilidad del fallo del blindaje ...	152
Tabla 6. 6. Descripción de gastos para la investigación.	155

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO II COHORTE

**ANÁLISIS DEL BLINDAJE DEL ACERO AISI 1045 POR PROYECCIÓN TÉRMICA DE
ALEACIÓN MICROPULVERIZADA EUTALLOY 11496 Y SU INFLUENCIA EN LA
RESISTENCIA AL DESGASTE SUPERFICIAL**

Autor: Ing. Jorge Alejandro Paredes Zumbana

Tutor: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

Fecha: Septiembre 11 del 2017

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se realizaron pruebas de blindaje sobre tres superficies de diferente rugosidad, que tienen como sustrato el acero AISI 1045, extraídas de un virador de molino de caña; los tres tipos de rugosidad fueron obtenidos por medio de los procesos de pulido mecánico con disco abrasivo, sandblasting con abrasivo mineral de naturaleza volcánica y granallado metálico. El material de blindaje fue la aleación micropulverizada Eutalloy 11496, aplicada por medio de la técnica de proyección térmica por llama. Las muestras con blindaje fueron sometidas a los ensayos de desgaste por abrasión y desgaste por corrosión acelerada en cámara de niebla salina; los resultados obtenidos indican que la mejor resistencia al desgaste abrasivo se da en las muestras preparadas superficialmente por sandblasting, que tienen un precalentamiento superficial entre 320 y 420°C, para conseguir un adecuado anclaje de la aleación metálica. Los resultados de corrosión acelerada mostraron las mayores tasas de corrosión en el sustrato sin blindaje y también se evidenció que la resistencia a la corrosión en el blindaje es buena siempre y cuando no existan defectos superficiales. Finalmente se plantea una propuesta de procedimiento para el blindaje de un virador de molino de caña, con el objetivo de que su vida útil sea favorable a una molienda de duración 8 meses.

Palabras clave: Blindaje, proyección térmica, resistencia al desgaste, abrasión, corrosión, dureza, análisis metalográfico, cámara de niebla salina, microscopía electrónica de barrido.

AMBATO TECHNICAL UNIVERSITY
CIVIL AND MECHANICS ENGINEERING FACULTY
POSTGRADUATE DIRECTORATE
MASTER OF MECHANICAL DESIGN II COHORT

Author: Ing Jorge Paredes Alexandro Zumbana

Tutor: Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.

Date: September 11, 2017

ABSTRACT

In the present research, shielding tests were carried out on three surfaces of different roughness, which have as substrate the AISI 1045 steel, extracted from a cane miller. The three types of roughness were obtained by means of the processes of mechanical polishing with abrasive disc, sandblasting with mineral abrasive of volcanic nature and metallic blasting. The shielding material was the Eutalloy micropulverized alloy 11496, applied by means of the flame thermal projection technique. Shielded samples were subjected to abrasion wear tests and accelerated corrosion wear in a salt spray chamber; The results indicate that the best resistance to abrasive wear occurs in samples prepared superficially by sandblasting, which have a surface preheating between 320 and 420 ° C, to achieve a suitable anchorage of the metal alloy. The results of accelerated corrosion showed the highest corrosion rates in the unshielded substrate and it was also evidenced that the corrosion resistance in the shielding is good as long as there are no surface defects. Finally, a procedure proposal is proposed for the shielding of a cane mill tipping machine, in order to ensure that its useful life is favorable to milling with a duration of 8 months.

Keywords: Shielding, thermal projection, wear resistance, abrasion, corrosion, hardness, metallographic analysis, saline fog chamber, scanning electron microscopy.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.- TEMA DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DEL BLINDAJE DEL ACERO AISI 1045 POR PROYECCIÓN
TÉRMICA DE ALEACIÓN MICROPULVERIZADA EUTALLOY 11496 Y SU
INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE SUPERFICIAL”**

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1.- CONTEXTUALIZACIÓN

A nivel mundial las técnicas de protección contra el desgaste se han ido posicionando de manera importante en el sector de mantenimiento y protección de instalaciones industriales; una protección óptima contra el desgaste se consigue mediante una selección adecuada de los materiales. El material base aporta las propiedades mecánicas para la resistencia estructural, mientras que el “blindaje” o recubrimiento determina su comportamiento frente a la oxidación, corrosión y resistencia al desgaste.

Muchos criterios a nivel sudamericano, han concluido que, “billones de dólares son anualmente arrojados a la chatarra”, siendo estos depósitos de materiales catalogados como inservibles, irreparables, piezas gastadas, obsoletas, fuera de servicio, etc. siendo también muchas de ellas depositadas por largos años en bodegas como repuesto que nunca serán utilizados; y todo esto atribuyendo al enemigo número uno de la industria, el desgaste, causante de retirar prematuramente de servicio muchas de las piezas.

Varios sectores de la industria han visto la necesidad de estudiar a fondo el fenómeno del desgaste abrasivo y corrosivo, causantes de generar pérdidas de eficiencia, aumento en el consumo energético, reemplazo de piezas desgastadas, tiempos muertos en los procesos,

entre otros aspectos que afectan directamente a su proceso productivo y de desarrollo; todo va encaminado a la gran importancia que tiene la ingeniería de las superficies, tras la búsqueda de alternativas que incrementen la vida útil de las máquinas, aumenten su eficiencia y reduzcan los costos de producción y de mantenimiento.

En el país, muchos ingenios azucareros han optado por el uso de recubrimientos como elemento de protección en piezas contra el desgaste; específicamente el área de molienda incluye componentes que por su disposición, geometría y entorno permiten la presencia de los fenómenos del desgaste y corrosión. Estos componentes que se encuentran dentro de los molinos de caña son las masas y los viradores; siendo este último el que comúnmente tiende a desecharse debido al desgaste superficial que presenta después del proceso.

El sector de la industria azucarera mediante el uso de la técnica de proyección térmica ha tenido una evolución significativa en los últimos años debido a sus grandes ventajas en la aplicación de revestimientos en piezas desgastadas, ya que es un proceso relativamente económico, rentable, de fácil aplicación y muy versátil.

1.2.2.- ANÁLISIS CRÍTICO

El costo generado por mantenimiento de los equipos en un ingenio azucarero es un componente muy significativo dentro de los costos de producción, de tal manera, que si se reducen al máximo los costos por mantenimiento se verá reflejado en la eficiencia y economía del proceso productivo.

El efecto que tienen los fenómenos de desgaste y corrosión en la superficie de los viradores de un molino de caña es realmente agresivo, razón por la cual, en la mayoría de veces a simple vista se opta por reemplazar el componente; pero entre reemplazar el componente y tratar de recuperarlo superficialmente se consigue aprovechar al máximo los recursos materiales, se reducen tiempos de paros debido a la compra de repuestos que en muchos de los casos son de importación.

Es importante también garantizar que el proceso de recuperación de las superficies de los viradores sea lo menos complejo posible, con la finalidad que los mismos operadores tengan la capacidad de realizarlo, evitando así, gastos por subcontratación de mano de obra, alquiler de equipos e insumos costosos; es por eso que el proceso de recuperación de superficies por proyección térmica se torna amigable a su operación, siempre tomando en cuenta las respectivas seguridades.

1.2.3.- PROGNOSIS

Si la presente investigación no se llevara a cabo, seguirá existiendo el desecho de componentes como es el caso de los viradores de los molinos de caña, mismos que al presentar desgaste y corrosión superficial son almacenados en la bodega de insumos y en ciertas ocasiones desechados al patio de chatarra; sin contemplar la posibilidad de recuperarlos mediante blindaje superficial por proyección térmica y así prolongar su vida útil.

1.2.4.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo el blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 influye en la resistencia al desgaste superficial?

1.2.5.- PREGUNTAS DIRECTRICES

- ¿Cuál es el tipo de desgaste que presenta un virador de un molino de caña?
- ¿Cuál es el tipo de corrosión que presenta un virador de un molino de caña?
- ¿Qué tipo de preparación superficial debe tener el acero AISI 1045 previo al blindaje por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496?
- ¿Cómo evaluar la resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión en el virador de acero AISI 1045 de un molino de caña?

1.2.6.- DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.6.1.- DELIMITACIÓN DE CONTENIDOS

La investigación se centra en los siguientes campos:

- Ingeniería Mecánica
- Ingeniería de Superficies
- Procesos de fabricación
- Desgaste superficial
- Corrosión

1.2.6.2.- DELIMITACIÓN ESPACIAL

La presente investigación se realizará en las instalaciones de Energías del Agro San Juan S.A. ubicado en Playas Villamil Provincia del Guayas, en donde se extraerán las muestras de acero AISI 1045 que pertenecen al virador del molino de caña, y se llevará a cabo el proceso de blindaje por proyección térmica.

Los ensayos de dureza, resistencia al desgaste por abrasión, ensayos con microscopio electrónico de barrido, se llevarán a cabo en los laboratorios de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Los ensayos de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina se llevarán a cabo en los laboratorios de Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito.

1.2.6.3.- DELIMITACIÓN TEMPORAL

El presente trabajo investigativo se desarrollará en un periodo de seis meses, comprendidos entre Abril 2017 a Septiembre del 2017.

1.3.- JUSTIFICACIÓN

El área de molinos del Ingenio Azucarero San Juan es quizá el área más importante de la planta, ya que en ella se obtiene el jugo de caña; que se extrae al hacer pasar la caña de azúcar desfibrada por un tándem de 4 molinos ubicados en serie.

Dentro del conjunto que forma el molino de caña existen componentes metálicos que se exponen unos con otros a fricción, dando como resultado desgaste de las superficies, pérdidas de material y en el peor de los casos rotura del componente. Las masas de los molinos se mueven por la fuerza de rotación que ejerce el motoreductor y a medida que el colchón de caña desfibrada ingresa entre las masas, se presiona contra la masa y el virador que se encuentra en la parte inferior, produciendo aún más fricción entre componentes.

La caña desfibrada no viene limpia y por lo general lleva consigo materiales como maderos, piedras, tierra, metales, etc.; materiales que incrementan el grado de desgaste superficial en el virador y esto ocasiona que la extracción de jugo de caña se vuelva ineficiente, ya que el setting, holgura o separación que debe existir entre los componentes esta determinado para que se produzca una determinada extracción de jugo.

A medida que transcurren los días de zafra (tiempo de duración del proceso de elaboración de azúcar) y molienda, el desgaste del virador es mayor, razón por la cual, se ve la necesidad de realizar un blindaje a la superficie del virador que más está expuesta a fricción. Así mismo la composición química del jugo de caña permite que el virador al encontrarse en contacto con él, se exponga a un proceso corrosivo.

Esta investigación resulta factible, se cuenta con los medios bibliográficos necesarios y con la tecnología necesaria y adecuada para realizar la técnica de blindaje por proyección térmica, con el propósito de que los resultados obtenidos sean de gran utilidad para el Ingenio San Juan, así como también beneficiando y fortaleciendo las fuentes de consulta de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, la Universidad Técnica de Ambato, la Provincia de Tungurahua y el resto del país.

1.4.- OBJETIVOS

1.4.1.- OBJETIVO GENERAL

Analizar el blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 para determinar la resistencia al desgaste.

1.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el tipo de desgaste que presenta un virador de un molino de caña
- Determinar el tipo de corrosión que presenta un virador de un molino de caña
- Preparación superficial del acero AISI 1045 previo al blindaje por la técnica de proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496
- Determinar la resistencia al desgaste y a la corrosión del acero AISI 1045 blindado superficialmente con la técnica de proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1.1.- ANTECEDENTES

A nivel internacional y local ha existido interés acerca del recubrimiento de metales por medio de la técnica de proyección térmica, entre las investigaciones más destacadas se detallan a continuación:

En Austria, Friedrich Franek, Ewald Badisch y Martin Kirchgabner, en su artículo técnico bajo el tema: “Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials”, publicado en el 2009, proporcionan una visión general sobre la selección de equipos y procedimientos de prueba más relevantes que se pueden realizar a las piezas de maquinarias que han sido recubiertas superficialmente para incrementar su resistencia a la abrasión e impacto en muchos campos de la industria. Sus experiencias se basan en ensayos tribológicos, análisis de materiales, metalografía y métodos matemáticos. Entre los ensayos más relevantes y destacado por parte de los autores, está el ensayo de abrasión continua o también conocido como ensayo con rueda de goma y arena seca de acuerdo a la norma ASTM G65; este ensayo acompañado del análisis metalográfico han permitido caracterizar el material y determinar sus propiedades frente al desgaste abrasivo, así como también se han presentado parámetros de operación para los ensayos de desgaste por abrasión según los procedimientos tipo A, B y C que se describen en la norma ASTM G65.

Ronny Cristóbal Aroca Delhi, en su Tesis de Grado para la Escuela Superior Politécnica del Litoral “ESPOL” presentada en el 2010, bajo el tema “Análisis de recubrimientos duros para molinos de caña de azúcar”, evidencia la eficiencia de utilizar recubrimientos duros en las masas de los molinos de caña; describe las condiciones del entorno al que están expuestas las masas así como el material que lo compone. Finalmente presenta una forma

de cálculo de pérdidas económicas que se generan al no realizar un proceso de recubrimiento en los componentes. Los recubrimientos duros que expone el autor, consisten en la aplicación de una capa superficial más dura y resistente que el metal base, este recubrimiento será destinado a resistir la corrosión, resistir entornos de trabajo a elevadas temperaturas y para resistir el desgaste causado por abrasión, erosión, fricción o impacto. El recubrimiento duro que propone el autor son las fundiciones blancas de alto cromo depositadas por soldadura y la forma de evidenciar sus bondades o perjuicios son los ensayos de laboratorio como: durometría, metalografía y análisis químico. Finalmente el autor concluye que el recubrimiento duro utilizado no aplica para todos los elementos del molino, su aplicación es puntual en determinadas zonas de las masas y esto se lo pudo determinar gracias a los ensayos de laboratorio que se plantearon.

Así mismo, Wilder Gutiérrez Quintero en su Tesis de Grado presentada en la Universidad Nacional de Colombia en el 2014, bajo el tema: “Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos producidos por proyección térmica para aplicaciones navales”, realizó el estudio de la resistencia al desgaste abrasivo de dos tipos de recubrimiento a base de níquel, Metaceram y Nitec, aplicados a dos tipos de sustratos, fundición gris y bronce fosforado; mediante la técnica de proyección térmica a la llama. Como etapa inicial el autor construyó un banco de pruebas para ensayos de desgaste abrasivo bajo la norma ASTM G-65; bajo esta norma el autor calibra el banco de ensayos para cada uno de los parámetros incluyendo los parámetros automatizados y los que se calibran de forma manual. Seguidamente procede a depositar los recubrimientos en los sustratos y finalmente realiza la caracterización de las probetas mediante técnicas de microscopia notando una mayor resistencia al desgaste del Metaceram depositado en el sustrato de fundición gris. Las conclusiones que el autor pudo determinar se dieron gracias al uso de ensayos de laboratorio, como el análisis de la rugosidad superficial, análisis de la dureza antes y después del recubrimiento, análisis metalográfico y técnicas de microscopia como son: microscopio electrónico de barrido, análisis químico por energía dispersa y difracción de rayos X.

2.1.2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.2.1.- Tren de molienda de un ingenio azucarero

Se entiende como “Ingenio Azucarero”, al conjunto de sistemas y elementos mecánicos que se encargan de procesar la caña de azúcar, para elaborar por medio de procesos químicos y térmicos azúcar para el consumo humano. Comúnmente, en un ingenio azucarero el proceso de extracción de jugo de caña se realiza en un tren de 4 molinos como muestra la Figura 2.1, cada molino está compuesto de 4 masas ó también conocidas como rodillos de extracción, los cuales giran entre 3 y 6 rpm por la acción de sistemas motrices y de transmisión; las masas tienen la función de extraer el jugo del bagazo por medio de fuerzas de compresión. ^[1]

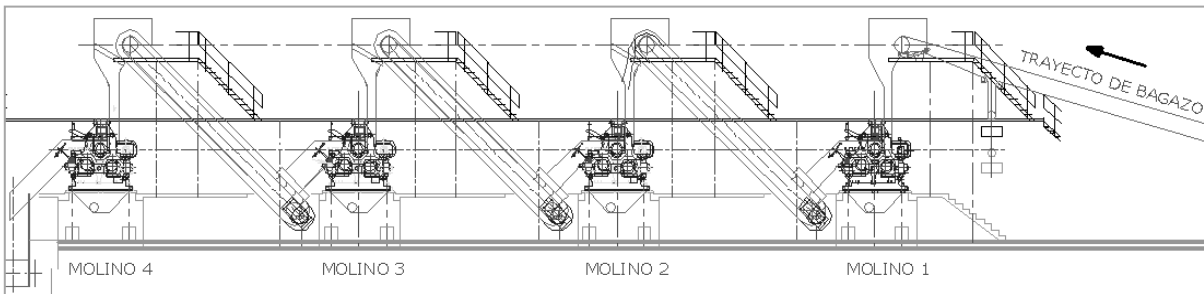


Figura 2. 1. Tren de molienda del ingenio azucarero San Juan

Fuente: Autor: Jorge Paredes.

En el proceso de molienda se considera que la materia prima es la caña preparada la cual está compuesta por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo; pero en ocasiones es posible que junto con la materia prima vengan sólidos ajenos al proceso, tales como, piedras, metales que pertenecen a las cuchillas de las cosechadoras, tierra, maderos, culebras, etc. y dependiendo de cuan eficientes sean los elementos que se encargan de separar del bagazo estos sólidos ajenos al proceso se podrá garantizar que los componentes mecánicos de los molinos no se vean afectados.

Componentes de un molino de caña

La Figura 2.2 muestra los componentes más importantes que intervienen en la extracción del jugo de caña por el efecto de la compresión del bagazo, y son: los cabezales o “headstocks” que se encargan de soportar las masas, los rodillos o masas que al presionarse entre sí comprimen el bagazo para extraer su jugo y el virador o cuchilla central (Figura 2.3) que se encarga de remover el bagazo que se queda adherido a la masa de alimentación y encamina ese bagazo a la masa de descarga. Las masas, el virador y el bagazo están sometidos a presión y por ende generan fricción entre sus superficies. [2]

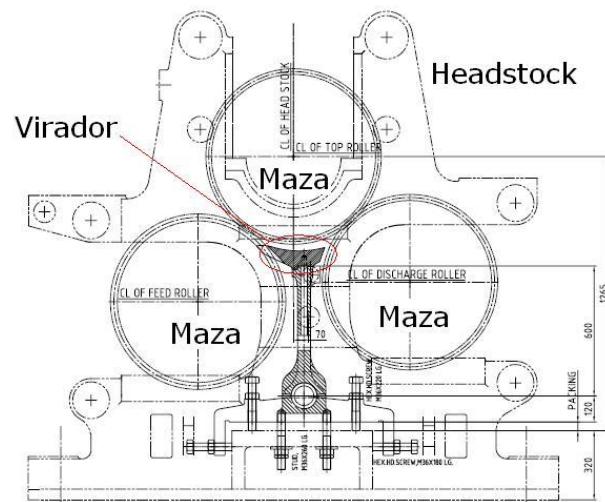


Figura 2. 2. Componentes de un molino que permiten la extracción de jugo del bagazo

Fuente: Autor: Jorge Paredes.



Figura 2. 3. Virador o cuchilla central de un molino de caña

Fuente: Autor: Jorge Paredes.

Fuerzas que actúan sobre el virador

Primero es preciso señalar que la compresión del colchón de bagazo en el molino se hace posible gracias a una fuerza de presión que actúa sobre la masa superior, que se genera mediante el uso de un sistema de presión hidráulica, como muestra la Figura 2.4. ^[3]

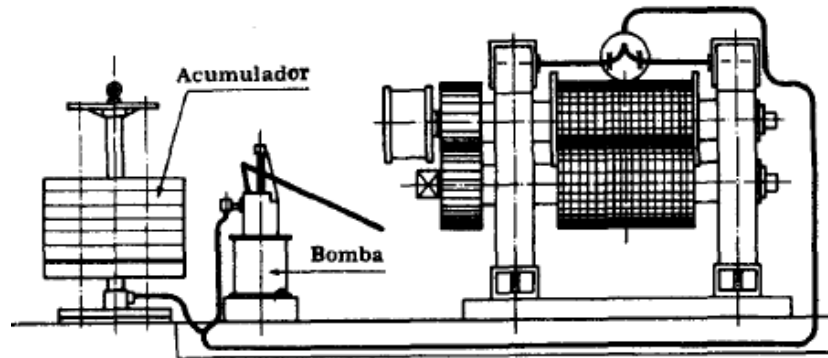


Figura 2. 4. Sistema de presión hidráulica

Fuente: Manual para ingenieros azucareros ^[3]

Los valores de la presión hidráulica que se aplica a la masa superior están en el orden de 160, 180, 200 y 210 kg/cm², para los molinos 1, 2, 3 y 4 respectivamente; dependiendo del colchón de bagazo que se desea pasar entre las masas a lo que se llama “setting”.

En la Figura 2.5 se puede observar la distribución de fuerzas que típicamente se presentan en un sistema de molino de 3 masas. La magnitud y dirección real de las fuerzas dependerá de factores tales como, rendimiento, carga hidráulica, dispositivos de alimentación, geometría del molino, configuración del molino y del virador o cuchilla central. ^[2]

Según Peter Rain del “Cane Sugar Engineering”, las fuerzas y sus magnitudes aproximadas en relación a la carga hidráulica F_{vert} (P en algunos casos), se pueden definir de acuerdo al polígono de fuerzas de la Figura 2.6 y con las siguientes expresiones:

- F_D ($0.72 * F_{vert}$), es la reacción de la compresión de la masa de descarga, esta es la fuerza principal de trabajo. Actúa en una dirección de aproximadamente 2° a 3° en el sentido de las agujas del reloj desde el plano axial hasta la masa de descarga.

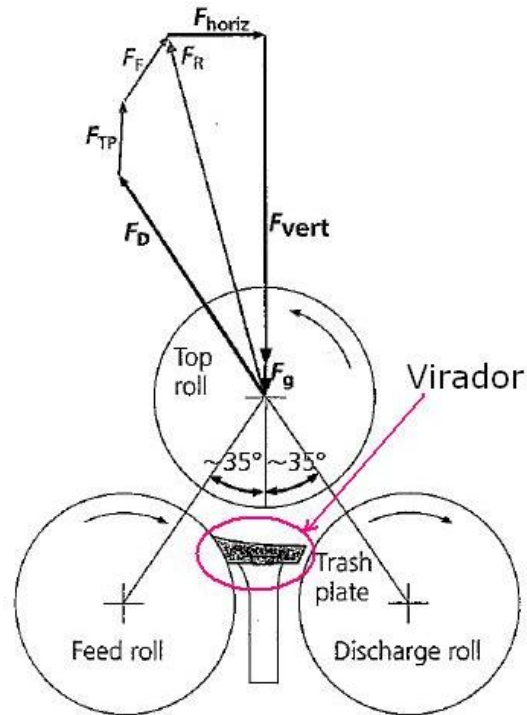


Figura 2. 5. Fuerzas directas que actúan sobre la masa superior
Fuente: Cane Sugar Engineering ^[2]

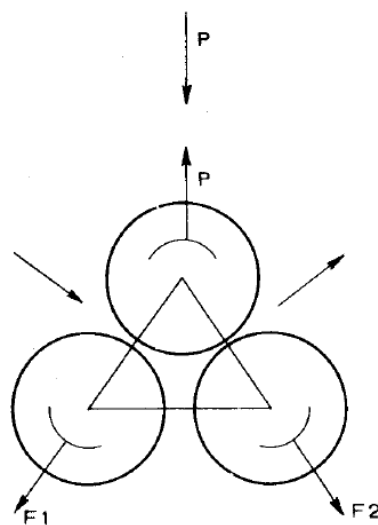


Figura 2. 6. Polígono de fuerzas para la resolución de fuerzas en un molino
Fuente: Manual para ingenieros azucareros ^[3]

- F_{TP} ($0.25 * F_{vert}$), es la reacción de la placa del virador que actúa cerca de 10° en sentido horario de la vertical. Absorbe del 20% al 25% de la carga hidráulica aplicada dependiendo de los ajustes del virador.
- F_F ($0.17 * F_{vert}$), es la reacción de la masa de alimentación que actúa a lo largo del plano axial con respecto a la masa de alimentación y usualmente se aproxima del 20% al 25% de la magnitud de F_D .
- F_R ($1.06 * F_{vert}$), es la fuerza resultante global que actúa radialmente sobre la masa superior a través de los cojinetes. En la Figura 2.5 está a 15° de la vertical pero las fuerzas de torque (no mostradas) incrementan este ángulo de 20° a 25° .
- F_{horiz} ($0.26 * F_{vert}$), es la fuerza resultante horizontal (lateral) en los cojinetes superiores, usualmente equivale al 25% de la carga hidráulica.
- F_{vert} ($1.00 * F_{vert}$), es la fuerza vertical sobre los cojinetes superiores, ejercida por el sistema hidráulico del molino.
- F_g ($0.03 * F_{vert}$), es la fuerza gravitatoria sobre la masa superior, usualmente equivale del 3% al 5% de la carga hidráulica.
- Se puede observar que en el diagrama de fuerzas de la Figura 2.5 no se están mostrando las fuerzas de torque que actúan sobre la masa, ni los torques en el piñón y las fuerzas de separación. [2]

Entonces queda definido que una cierta parte de la presión hidráulica P es absorbida por el virador o cuchilla central y que su valor equivale al 20% si el ajuste del virador no es muy alto (Figura 2.6). [3]

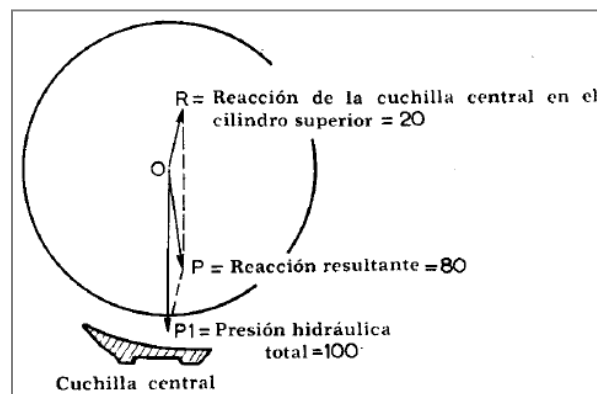


Figura 2. 7. Efecto de la reacción del virador o cuchilla central en la presión hidráulica

Fuente: Manual para ingenieros azucareros [3].

Desgaste y acanaladuras en el virador

La superficie del virador no se desgasta uniformemente, generalmente se le forman canales que corresponden, en la punta del virador, a las ranuras de la masa de entrada pero que divergen del centro a las extremidades en el sentido de la marcha del bagazo (Figura 2.8).^[3]

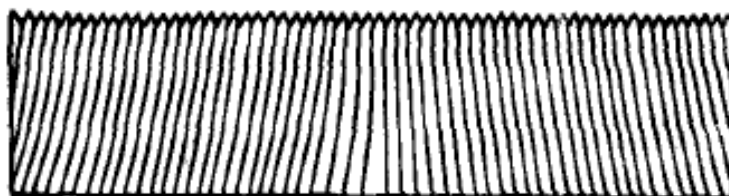


Figura 2. 8. Desgaste del virador en canales (vista superior)

Fuente: Manual para ingenieros azucareros ^[3].

Esta divergencia se debe a que la carga de bagazo en los molinos es siempre más fuerte en el centro que en las extremidades de las masas. Cuando el bagazo comprimido y estrechamente canalizado por las ranuras de las masas de entrada desemboca en el virador tiende a repartirse uniformemente distribuyéndose del centro a las extremidades (Figura 2.9).



Figura 2. 9. Huellas de desgaste del virador del molino 1 (vista superior)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Materiales de los viradores

En Sud África se han ensayado viradores de acero inoxidable, al desgastarse se pulen como espejos y se desgastan poco. La fricción del bagazo es muy pequeña y la potencia absorbida

por esta fricción disminuye proporcionalmente. Son más caros que los viradores ordinarios de acero pero duran dos o tres veces más. Los viradores de acero inoxidable se cambian con menor frecuencia y esta es su principal ventaja.

Investigadores como Munson ha determinado después de diversos experimentos que el coeficiente de fricción es independiente de la naturaleza del metal con el que está fabricado el virador. ^[3]

Los viradores o cuchillas centrales pueden ser fabricados de hierro fundido de grano cerrado, hierro de grafito esferoidal o equivalentes, “semi-elaborado” que son mezclas de hierro fundido y chatarra de acero, así como también se puede fabricar de acero fundido o acero inoxidable; la durabilidad y costo tiende a aumentar en el orden indicado. Para alargar la vida útil de los viradores, en la práctica se hace común realizar un endurecimiento de la superficie (usualmente con material de carburo de cromo). ^[2]

2.1.2.2.- Desgaste de los metales

El desgaste se puede definir como el deterioro no intencional resultante del empleo o del ambiente; puede considerarse esencialmente como un fenómeno de superficie. El desgaste es una de las influencias más destructivas a que están expuestos los metales. ^[4]

El desplazamiento y la separación de las partículas mecánicas de una superficie mecánica puede producirse por contacto con:

- a) Otro metal (desgaste adhesivo metálico)
- b) Un abrasivo metálico o uno no metálico (abrasión)
- c) Líquidos o gases en movimiento (erosión); acompañada por un tipo de corrosión

Los tipos de desgaste descritos anteriormente pueden subdividirse en desgaste por fricción rodante o por fricción deslizante y además, de acuerdo a si puede utilizarse o no la lubricación.

El desgaste que implica un solo tipo es raro, y en la mayoría de los casos ocurren el desgaste abrasivo y el adhesivo. Cada forma de desgaste está afectado por una serie de condiciones, sean estas: ^[4]

- Materiales componentes
- El ambiente
- Tipo de carga aplicada
- Velocidades relativas de las piezas que se acoplan
- Lubricante
- Temperatura
- Dureza
- Terminado de la superficie
- Presencia de partículas extrañas
- Composición y compatibilidad de las piezas de acoplamiento implicadas

El desgaste en la industria no ocasiona fallas violentas, pero genera consecuencias funcionales, tales como: ^[5]

- Reducción de la eficiencia
- Mayor consumo de energía
- Pérdidas de potencia y la generación de calor en los componentes, debido al aumento de los coeficientes de fricción
- Incremento del consumo de lubricantes
- Reemplazo de componentes desgastados

Mecanismos de desgaste

Desgaste Adhesivo: también llamado de hendidura, erosión, prendimiento y ludimiento de las superficies, pequeñas salientes producen fricción por interferencia mecánica, con movimiento relativo de las superficies en contacto que incrementan la resistencia para movimiento ulterior. (Figura 2.10). ^[4]

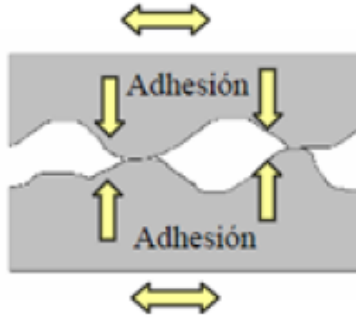


Figura 2. 10. Desgaste adhesivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Si la fuerza de impulso es suficiente para mantener el movimiento, las partículas interlazadas se deforman; si son de un material frágil pueden arrancarse, entonces, se concluye que la resistencia al desgaste se mejorará evitando el contacto metal-metal e incrementando la dureza para resistir el mellado inicial, aumentando la tenacidad para resistir la separación violenta de las partículas metálicas, e incrementando la uniformidad de la superficie para eliminar salientes.

Desgaste abrasivo: ocurre cuando partículas duras se deslizan o ruedan bajo presión a través de una superficie, o cuando una superficie dura se frota a través de otra (Figura 2.11). Las partículas desgastadas por rozamiento del objeto más duro tienden a rasguñar o acanalar el material más suave y producir la violenta separación de las partículas metálicas.

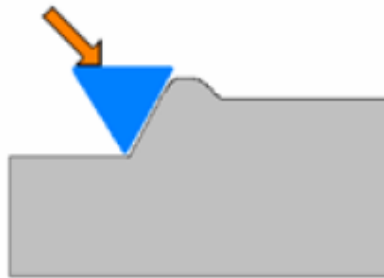


Figura 2. 11. Desgaste abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Desgaste por fatiga superficial: fatiga y formación de grietas en regiones de la superficie debido a esfuerzos cíclicos que posteriormente ocasionan la separación del material (Figura 2.12).^[5]

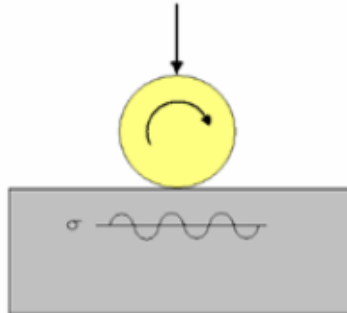


Figura 2. 12. Desgaste por fatiga superficial

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Desgaste por corrosión: consiste en la formación de productos de reacciones químicas como un resultado de interacciones químicas entre los elementos del tribosistema o cuando ocurre el deslizamiento de dos superficies en ambientes corrosivos. (Figura 2.13)

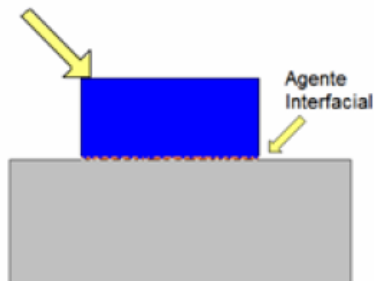


Figura 2. 13. Desgaste corrosivo o químico

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Desgaste por impacto: comprende dos tipos de fenómenos de desgaste, el erosivo y el de percusión; la erosión se puede dar por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas dentro de un fluido como agua o aire, y todo este conjunto golpea la superficie (Figura 2.14). La percusión ocurre por impactos repetitivos de cuerpos sólidos de mayor tamaño.^[5]

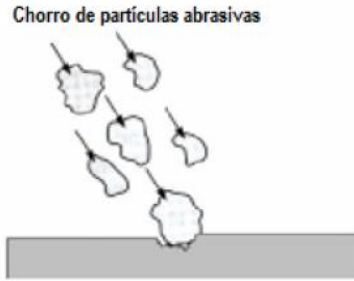


Figura 2. 14. Desgaste por impacto

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Desgaste por cavitación: se da cuando pequeñas cantidades de burbujas se forman en un fluido sometido a grandes velocidades y golpean a la superficie provocando su erosión debido a grandes presiones transitorias especialmente durante el colapso de las burbujas (Figura 2.15).^[5]

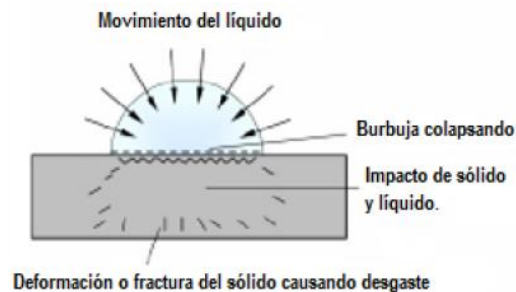


Figura 2. 15. Desgaste por cavitación

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Desgaste Abrasivo

Se define al desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas con una superficie y se mueven a lo largo de ella; estas partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o el producto del desgaste de las mismas, que tienden a cortar y/o arrancar material de la superficie, generando virutas y/o causando deformación plástica severa.^[5]

Clasificación del desgaste abrasivo

Superficie abrasiva se le denomina a la superficie que sufrió un menor daño de las dos superficies que estuvieron en contacto. La magnitud del daño producido depende de la cantidad de partículas abrasivas en ambas superficies, de la velocidad de contacto, de las condiciones ambientales, de la temperatura y de la fuerza ejercida en ambas superficies; según esto se lo clasifica en dos categorías: ^[6]

De acuerdo al tipo de contacto: que puede ser abrasión de dos o tres cuerpos (Figura 2.16)

- **Abrasión de dos cuerpos:** ocurre cuando una superficie irregular de un material es presionada contra otra de menor dureza
- **Abrasión de tres cuerpos:** ocurre cuando existen partículas con una dureza superior atrapadas en medio de dos superficies. La fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas

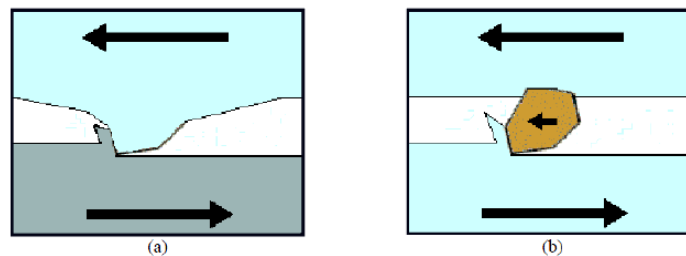


Figura 2. 16. Desgaste por abrasión a) de dos cuerpos, b) de tres cuerpos

Fuente: Autor: Jorge Paredes

De acuerdo al nivel de daño sufrido: se ilustra en la Figura 2.17 y se clasifica en:

- **Abrasión de bajo esfuerzo o rayado:** ocurre debido a un frotamiento relativamente suave de partículas abrasivas contra superficies o elementos metálicos, las partículas no se desintegran (rompen) porque las cargas son bajas.

- **Abrasión de alto esfuerzo o desbaste:** se da cuando la fuerza que ejerce entre las dos superficies es lo suficientemente alta como para triturar las partículas, aquí se da la deformación plástica (rayado y picado del material).
- **Abrasión por surcos o ranuración (Gouging):** es la remoción de material debido a la acción repetitiva de altas cargas compresivas producidas por partículas grandes como rocas que dejan a su paso grandes surcos en la superficie desgastada.
- **Abrasión por pulido:** se trata de un desgaste muy suave en donde la abrasión es muy fina y el material se desprende por medio de frotamientos contra otras superficies, el rayado es poco visible y no hay fractura ni deformación plástica.

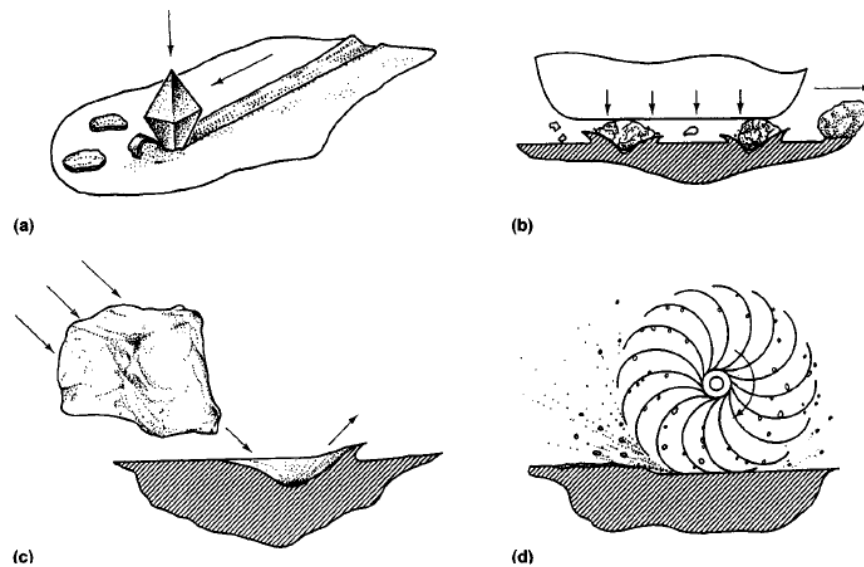


Figura 2. 17. Tipos de desgaste abrasivo según el nivel de daño sufrido

a) bajo esfuerzo, b) alto esfuerzo, c) gouging, d) pulido

Fuente: Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance ^[6]

Mecanismos del desgaste abrasivo

Un mecanismo de desgaste se lo conoce a la forma en que es arrancado el material de la superficie de una pieza. Exámenes microscópicos revelan que el desgaste abrasivo se asemeja a un proceso de corte que realiza una herramienta a un material, debido al contacto de partículas o asperezas afiladas de la superficie duras sobre una superficie blanda; debido

a esto se subdivide en los siguientes mecanismos: microarado, microcorte, microfatiga y microagrietamiento (Figura 2.18).^[5]

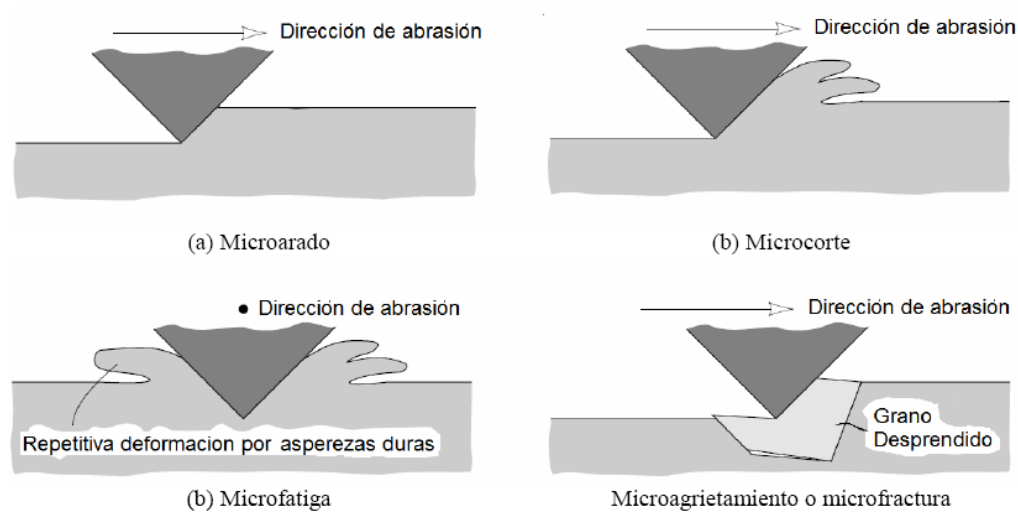


Figura 2. 18. Mecanismos de desgaste por abrasión

Fuente: Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos^[5]

- **Microarado:** se debe al paso de una partícula abrasiva que no produce desprendimiento de material de una superficie desgastada, el material desgastado se acumula delante de la partícula formando un surco.
- **Microfatiga:** cuando la superficie puede ser arada en repetidas ocasiones por las partículas que se encuentran en la superficie produciendo desprendimiento de material.
- **Microcorte:** si la partícula abrasiva o aspereza penetra la superficie liberando material de igual volumen que la ranura.
- **Microgrietas:** pueden ocurrir por las altas concentraciones de tensión de la superficie frágil cuando se desliza una partícula produciendo desprendimiento de material en la superficie.

Ecuaciones de cálculo para el desgaste abrasivo

Las ecuaciones de cálculo para el desgaste abrasivo de dos o tres cuerpos se pueden desarrollar a partir del desgaste producido por un solo grano o partícula abrasiva.

Según González A., de “Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno”, uno de los más simples modelos de cálculo se basa una rígida aspereza modelada por la indentación provocada con un cono que atraviesa la superficie como muestra la Figura 2.19. Este modelo se describe como una dura aspereza cónica con pendiente (θ) bajo la acción de una carga (W), recorre una superficie blanda y se asume que todo el material desplazado por el cono es perdido en forma de fragmentos ó residuos de desgaste. ^[7]

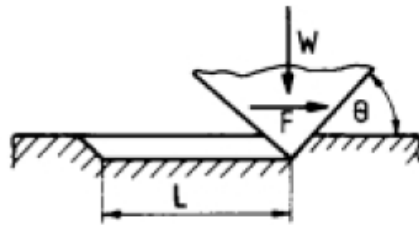


Figura 2. 19. Esencia del desgaste por abrasión

Fuente: Estudio de la influencia de las propiedades físicas ^[7]

La siguiente ecuación se conoce como Ecuación de Archard, la cual se dedujo del desgaste adhesivo, pero se ha demostrado también que es muy útil para el desgaste abrasivo. ^[5]

$$V = \frac{K * L * x}{H} \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde K es un factor que depende de la forma de la partícula, de la naturaleza del proceso y de las propiedades del material, generalmente su valor es mayor para desgaste abrasivo de dos cuerpos que los obtenidos en el desgaste abrasivo de tres cuerpos, debido

principalmente a que las partículas están libres dentro del sistema de deslizamiento, de tal manera que pueden moverse fácilmente sobre la superficie y puede que no siempre desgasten la pieza; el abrasivo puede rodar por la superficie en vez de deslizarse y formar un surco. (V) describe el volumen de desgaste abrasivo producido por un solo grano en una distancia de deslizamiento (x) ó (L) en el caso de la Figura 2.19. (H) es la dureza del material y se divide sobre dos ya que sólo la mitad de la partícula abrasiva está en contacto con el material. Finalmente (L) es la carga que se aplica a la partícula.

Comúnmente los materiales se describen como aquellos que tienen buena o mala resistencia al desgaste, R , la cual se define como el inverso del volumen de desgaste (Gutiérrez W, 2004), así: ^[5]

$$R = \frac{1}{v} \quad \text{Ec 2.2}$$

El parámetro principal para determinar el desgaste abrasivo, es la pérdida de masa y está dado por:

$$V_p = \frac{(P_i - P_f)}{\delta} * 1000 \quad \text{Ec 2.3}$$

Donde:

V_p : volumen perdido en mm^3

P_i : peso inicial de la probeta en g

P_f : peso final de la probeta en g

δ : densidad del material en g/cm^3

Para garantizar la precisión y exactitud de los datos arrojados se utilizan métodos estadísticos, donde a partir del volumen perdido se calcula el promedio y la desviación estándar, todo esto para posteriormente determinar el coeficiente de variación como sigue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x)^2}{n - 1}} \quad \text{Ec 2.4}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} * 100 \quad \text{Ec 2.5}$$

Donde:

σ : desviación estándar

\bar{x} : media aritmética del volumen perdido en mm³

x: volumen perdido en mm³

n: número de ensayos

C_v: coeficiente de variación

El coeficiente de variación es uno de los datos más importantes ya que ayuda a identificar que tan buenos son los resultados obtenidos, este coeficiente debe ser máximo de 6% para el procedimiento B indicado en la norma ASTM G-65.

2.1.2.3.- Propiedades del material

Las principales propiedades del material que tienen influencia directa sobre el comportamiento del desgaste abrasivo son: dureza, tenacidad de fractura, estructura cristalina, microestructura, elementos de aleación, formación de precipitados y tamaño de las partículas. ^[5]

Dureza

Es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, por ejemplo una pequeña abolladura o rayadura. En estos ensayos se mide la profundidad o tamaño de la huella resultante, al haber aplicado un pequeño penetrador sobre una superficie del material a ensayar en condiciones controladas de carga y velocidad de

aplicación de la carga; cuanto más blando es el material, mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza. [8]

Se ha demostrado teórica y experimentalmente que la dureza de una material se correlaciona con su velocidad de abrasión. Khrushchov realizó una gran cantidad de pruebas y encontró una relación inversa entre la tasa de abrasión y la dureza recocida de los materiales puros (Figura 2.20). También probó aceros de diferente dureza. Las durezas eran inversamente lineales relacionadas con el desgaste abrasivo, excepto que tenían una pendiente diferente de la de los materiales puros. [21]

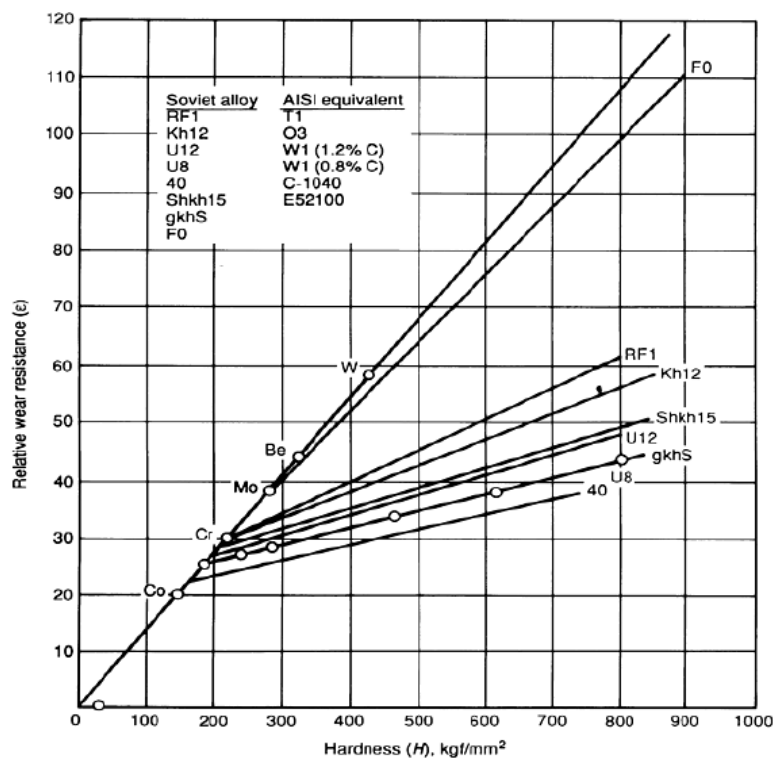


Figura 2. 20. Resistencia al desgaste vs dureza de metales puros y aleaciones

Fuente: Friction, Lubrication and Wear Technology [21]

- **Ensayos de dureza Rockwell**

Este ensayo utiliza diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar virtualmente cualquier metal o aleación desde el más duro al más blando.

Los penetradores son bolas esféricas de acero endurecido que tienen diámetros de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulgada y un penetrador cónico de diamante (Brale), el cual se utiliza para los metales más duros. ^[8]

Existen dos tipos de ensayos: Rockwell y Rockwell superficial; para el primer caso la carga menor es de 10 kg, mientras las cargas mayores son 60, 100 y 150 kg; para Rockwell superficial la carga menor es de 3 kg mientras que el valor de la carga mayor puede ser 15, 30 ó 45 kg.

En la Tabla 2.1 se indican varias escalas junto con los penetradores y cargas correspondientes.

Tabla 2. 1. Escalas de dureza Rockwell.

(Fuente: Callister, W. 2007)

<i>Scale Symbol</i>	<i>Indenter</i>	<i>Major Load (kg)</i>
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$ -in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$ -in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$ -in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$ -in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$ -in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$ -in. ball	150

- ***Ensayos de dureza Brinell***

En estos ensayos también se fuerza un penetrador duro esférico en la superficie del metal a ensayar. El diámetro del penetrador de acero endurecido (carburo de tungsteno) es de 10.00mm. Las cargas normalizadas están comprendidas entre 500 y 3000 kg en incrementos de 500 kg; durante un ensayo la carga se mantiene constante durante un tiempo especificado (entre 10 y 30s). Los materiales más duros requieren cargas mayores; el número de dureza Brinell, HB, es una función tanto de la magnitud de la carga como del diámetro de la huella resultante.

- **Ensayos de microdureza Vickers y Knoop**

También denominadas pirámide de diamante, en estos ensayos un penetrador de diamante muy pequeño y de geometría piramidal es forzado en la superficie de la muestra. Las cargas aplicadas son mucho menores que en las técnicas Brinell y Rockwell, están comprendidas entre 1 y 1000 g. Su nomenclatura son HK para Knoop y HV para Vickers, se consideran ensayos de microdureza debido a la magnitud de la carga y el tamaño del indentador; con la particularidad que son utilizadas para el ensayo de materiales frágiles, tales como las cerámicas. [8]

Conversión y correlación de la dureza

La escala de conversión más fiable que existe es la que corresponde a los aceros, esto se presenta en el Anexo E2, y muestra las durezas Knoop, Brinell y de las dos escalas Rockwell. Tanto la resistencia a la tracción como la dureza son indicadores de la resistencia de un metal a la deformación plástica; estas propiedades se muestran proporcionales en la Figura 2.21 para la resistencia a la tracción en función de la dureza HB para el caso de fundición, aceros y latones.

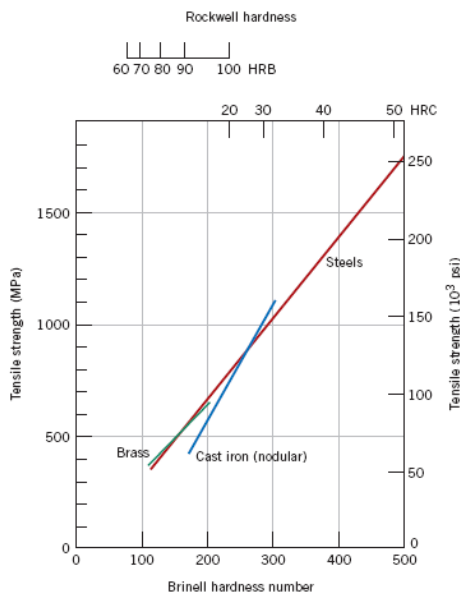


Figura 2. 21. Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción para el acero, latón y fundición

Fuente: Materials Science and Engineering [8]

Como regla general para los aceros, el número de dureza HB y la resistencia a la tracción (TS: Tensil Strength) están relacionados de acuerdo a las siguientes expresiones: ^[8]

$$TS(\text{psi}) = 500 * HB \quad \text{Ec 2.6}$$

$$TS(\text{Mpa}) = 3.45 * HB \quad \text{Ec 2.7}$$

Microscopía

La microscopía utiliza el microscopio óptico y el electrónico, mismos que contribuyen a la investigación de las características microestructurales de todo tipo de materiales; estos equipos llevan acoplados un equipo fotográfico y la imagen que recoge se denomina fotomicrografía.

Microscopía óptica

Con este equipo se utiliza la luz para estudiar la microestructura, sus principales elementos son los sistemas ópticos y de iluminación. En aquellos materiales que son opacos a la luz visible (todos los metales y muchos cerámicos y polímeros) sólo la superficie es susceptible a ser observada, y la luz del microscopio debe ser utilizada en reflexión. Esta investigación se denomina metalográfica, ya que los metales fueron los primeros en ser examinados con esta técnica.

Los detalles importantes de la microestructura serán revelados al preparar cuidadosamente las superficies, esta debe desbastarse y pulirse hasta que quede como un espejo; estas características se consiguen utilizando papeles abrasivos y polvos cada vez más finos, para finalmente revelar la microestructura tratando la superficie con un reactivo químico apropiado en un procedimiento denominado ataque. Algunos de los reactivos para el ataque químico se muestran en el Anexo F3.

Microscopía electrónica

Esta técnica se utiliza con el fin de conseguir muchos más aumentos que el microscopio óptico no alcanza a visualizar, ya que el microscopio óptico es de aproximadamente 2000 diámetros y algunos elementos estructurales son demasiados finos o pequeños para su observación. ^[8]

La imagen de la estructura investigada se genera utilizando haces de electrones en lugar de radiación lumínica. Estos microscopios tienen grandes aumentos y elevado poder resolutivo como consecuencia de la corta longitud de onda del haz de electrones.

- **Microscopía electrónica de transmisión:** la imagen se forma en un microscopio electrónico de transmisión (TEM) que está formada por un haz de electrones que atraviesa una probeta. Teniendo en cuenta que los materiales sólidos absorben los haces de electrones, la probeta se debe preparar de forma muy delgada para asegurar que la transmisión del haz incida a través de ella. El haz transmitido se proyecta en una pantalla fluorescente o película fotográfica a fin de conseguir la imagen.

Con este equipo, frecuentemente se utiliza para el estudio de dislocaciones con aumentos aproximadamente de 1000000.

- **Microscopía electrónica de barrido:** el microscopio electrónico de barrido (SEM) barre la superficie de la probeta con un haz de electrones y el haz reflejado de electrones se recoge y se muestra con la misma velocidad de barrido en un tubo de rayos catódicos (una pantalla similar a la TV), esta imagen puede ser fotografiada para caracterizar la probeta. La superficie debe ser eléctricamente conductora, independientemente de que esté o no pulida y atacada; los aumentos son posibles de 10 a 50000 diámetros, con una gran profundidad de campo.

El equipo cuenta con accesorios que consiguen el análisis químico elemental cualitativo y semicuantitativo de áreas superficiales muy localizadas.

Determinación del tamaño de grano

Dentro de las propiedades de un material policristalino generalmente se determina el tamaño de grano, existen técnicas que especifican el tamaño de grano en función del promedio de volumen de grano, del diámetro o del área.

Se puede calcular el tamaño de grano utilizando el método de intersección, según varias fotomicrografías que muestran la estructura granular, se trazan líneas rectas de la misma longitud, se cuentan los granos cortados por cada uno de los segmentos; se divide la longitud de la línea por el número medio de granos cortados por cada segmento. El diámetro medio de grano se obtiene dividiendo este resultado por los aumentos lineales de las fotomicrografías. ^[8]

El método más utilizado es el desarrollado por las ASTM, que tiene preparadas 10 cartas normalizadas, con granos de diferente tamaño medio de grano; cada carta está asignada por un índice, del 1 al 10, denominado índice de tamaño de grano. El mayor índice tiene el menor tamaño de grano, las probetas se deben preparar cuidadosamente para revelar la estructura granular, que se fotografía a 100 aumentos.

El tamaño de grano se asigna por comparación con el índice del tamaño de grano de la carta más parecida a la fotomicroografiada.

El índice de tamaño de grano mediante las diferentes cartas se realiza como sigue, el índice de tamaño de grano está asignado por n y el número medio de granos por pulgada cuadrada a 100 aumentos por N , y de acuerdo a W. Callister, ambos parámetros están relacionados por la siguiente ecuación:

$$N = 2^{n-1} \qquad \text{Ec 2.8}$$

2.1.2.4.- Norma ASTM G-65 para desgaste abrasivo

Esta norma se basa en una prueba estándar de desgaste abrasivo con arena seca y rueda de caucho; se simula el desgaste de materiales por medio de partículas abrasivas de tamaño controlado, en condiciones de bajo esfuerzo y de abrasión por tres cuerpos. ^[5]

La Tabla 2.2 muestra los cinco procedimientos que especifica la norma ASTM G-65 para ensayos de desgaste abrasivo, en donde se clasifican de acuerdo a los grados de resistencia al desgaste o a los espesores de los recubrimientos. Además, la tabla muestra los parámetros que se deben tener en cuenta para el ensayo como son: fuerza ejercida sobre la probeta, revoluciones de la rueda, y abrasión lineal (distancia de desgaste); sus valores son constantes para cada procedimiento. ^[9]

Tabla 2. 2. Procedimiento para ensayos de desgaste abrasivo.

(Fuente: ASTM G-65. 2001)

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^B N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion ^A m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

^A See 8.4.

N = Newton (SI metric term for force)

1 lbf = 4.44822 N

1 Kgf = 9.806650 N

^B Force tolerance is $\pm 3\%$.

Todas las ecuaciones que intervienen en los cálculos de volumen perdido por desgaste abrasivo se detallan en la norma, así como también las características del material abrasivo, las dimensiones de la probeta, la descripción de la máquina de ensayo (Figura 2.22), donde se especifican los componentes más importantes del equipo; se detallan también todas las variables a tomar en cuenta para la calibración del equipo.

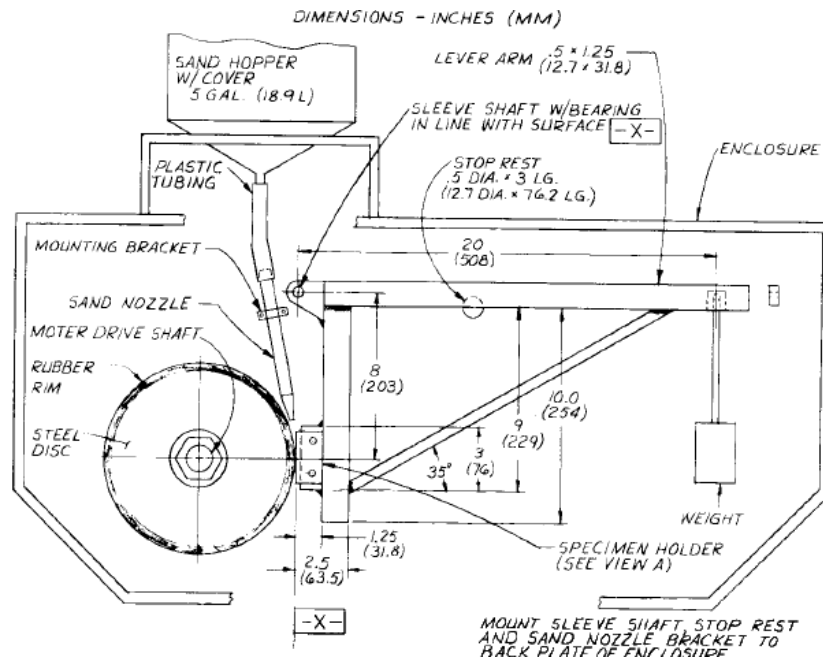


Figura 2. 22. Aparato para ensayos de desgaste abrasivo con rueda de caucho y arena seca

Fuente: ASTM G-65 ^[9]

2.1.2.5.- Corrosión de los metales

La corrosión puede definirse como la destrucción de un material por interacción química, electro-química o metalúrgica entre el medio y el material, generalmente es lenta, pero de carácter persistente. En algunos casos los productos de la corrosión existen como una película delgada adherente que solo mancha o empaña el metal y puede actuar como un retardador para ulterior acción corrosiva. En otros casos los productos de la corrosión son de carácter voluminoso y poroso, sin ofrecer ninguna protección. ^[4]

Tipos de corrosión

Pueden clasificarse convenientemente conforme a la apariencia del metal corroído, entre ellas están las siguientes: ^[10]

- Corrosión uniforme
- Corrosión galvánica o entre dos metales

- Corrosión por picadura
- Corrosión por grieta
- Corrosión intergranular
- Corrosión por esfuerzo
- Corrosión por erosión
- Daño por cavitación
- Corrosión por frotamiento
- Disolución selectiva o desaleante

La Figura 2.23 muestra esquemáticamente las formas más comunes de corrosión

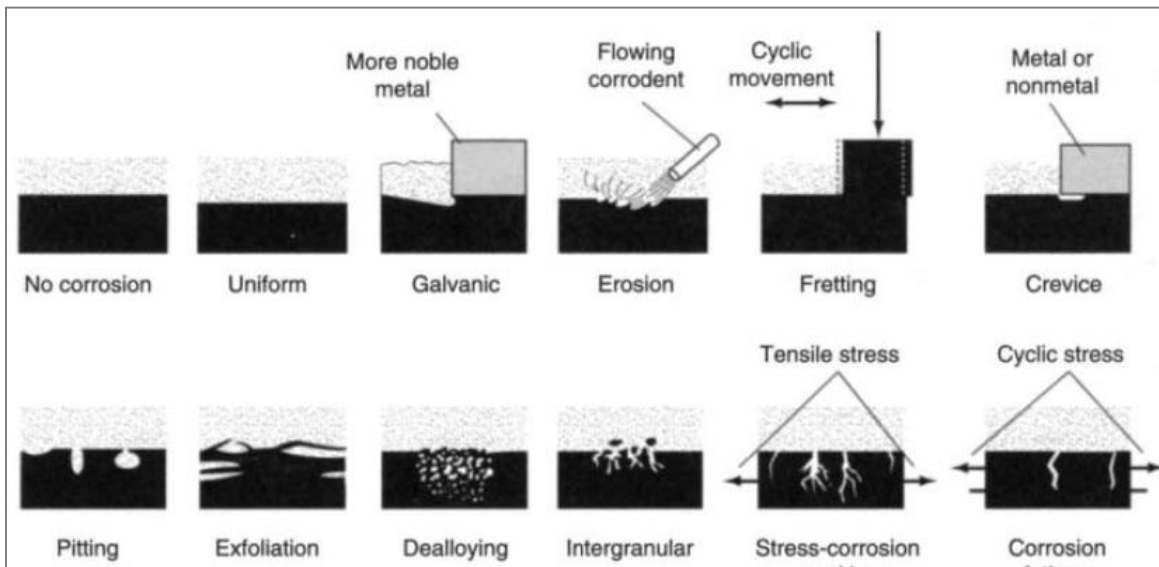


Figura 2. 23. Tipos comunes de corrosión

Fuente: Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance ^[6]

Corrosión uniforme: Se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre la totalidad de la superficie metal expuesta al entorno corrosivo, su control es relativamente fácil mediante: recubrimientos protectores, inhibidores y protección catódica.

Corrosión galvánica de dos metales: al unirse dos metales distintos ha de tenerse cuidado porque la diferencia de sus potenciales electroquímicos puede conducir a corrosión. Por ejemplo, el acero galvanizado es un acero recubierto de cinc, el metal que es el cinc se sacrifica para proteger a otro metal que es el acero; el cinc actúa de ánodo, se corroe y protege al acero que actúa de cátodo en esta pila galvánica. ^[10]

El potencial disponible para promover la reacción de corrosión electroquímica entre metales disímiles es sugerido por la serie galvánica, que enumera una serie de metales y aleaciones comunes dispuestos según su tendencia a corroerse cuando están en contacto galvánico ^[6] (Tabla de Anexo F1)

Corrosión por picadura: produce hoyos o pequeños agujeros en un metal, las picaduras son a menudo difíciles de detectar porque los pequeños agujeros pueden cubrirse con los productos de la corrosión.

Los metales y aleaciones son los más afectados por picadura o “pitting”, el hierro enterrado se corroe con la formación de hoyos poco profundos, pero los aceros al carbono en contacto con ácido clorhídrico o los aceros inoxidable sumergidos en agua de mar se corroen característicamente con la formación de pozos profundos. ^[6]

Corrosión por grietas: es una forma de corrosión electroquímica localizada que puede presentarse en grietas o hendiduras y bajo superficies protegidas donde pueden existir disoluciones estancas; se produce en sistemas de aleaciones como acero inoxidable y aleaciones de titanio, aluminio y cobre. ^[10]

Corrosión intergranular: es un ataque de corrosión localizada y/o adyacente a los límites de grano de una aleación. En condiciones ordinarias si un metal se corroe uniformemente, los límites de grano serán sólo ligeramente más reactivos que la matriz; pero, bajo otras condiciones, las regiones de límite de grano pueden ser muy reactivas, dando lugar a la corrosión intergranular que cause pérdidas de resistencia en la aleación e incluso una disgregación en los límites de grano.

Un ejemplo de corrosión intergranular ocurre en los aceros inoxidable austeníticos (18% de Cr y 8% de Ni en peso) cuando son calentados y enfriados lentamente en el intervalo de temperaturas de 500 a 800°C. En este intervalo de temperaturas pueden precipitar carburos de cromo en los límites de grano. ^[10]

Corrosión por esfuerzo: las altas tensiones residuales capaces de provocar la rotura de un metal por corrosión por esfuerzo, pueden ser consecuencia, por ejemplo, de tensiones térmicas introducidas por velocidades desiguales de enfriamiento, de un diseño mecánico defectuoso para esfuerzos, de transformaciones de fase durante el tratamiento térmico, el trabajo en frío o la soldadura. ^[10]

Corrosión erosiva: puede definirse como la aceleración en la velocidad del ataque de corrosión en un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo respecto a la superficie del metal. Cuando el movimiento relativo del fluido corrosivo es rápido, los efectos del desgaste mecánico y abrasión pueden ser severos. Esta corrosión se caracteriza por la aparición sobre la superficie del metal de surcos, valles, picaduras, agujeros y otras configuraciones de daños sobre la superficie del metal que generalmente se presentan en la dirección del avance del fluido corrosivo.

Daño por cavitación: es un tipo de corrosión erosiva y es causado por la formación e impulsión de burbujas de aire o cavidades llenas de vapor en un líquido que se encuentra cerca de la superficie metálica. La cavitación ocurre en la superficie del metal donde el líquido fluye a alta velocidad y existen cambios de presión tal y como acontece en impulsores y propulsores.

Corrosión por rozamiento: tiene lugar entre las interfaces de materiales bajo carga sometidos vibración y deslizamiento, origina surcos o agujeros rodeados de productos resultantes de la corrosión. En el caso de corrosión por rozamiento de metales los fragmentos de metal entre las superficies de roce están oxidados y algunas capas de óxido están disgregadas por desgaste; en consecuencia hay una acumulación de partículas de

óxido que actúan como abrasivo entre las superficies en rozamiento como las que se encuentran en ejes o cojinetes por ejemplo. ^[10]

Disolución selectiva: ó llamada lixiviación es la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida por un proceso de corrosión, un ejemplo común, es la descincificación en latones por la que se disuelve el cinc preferentemente respecto al cobre; procesos semejantes ocurren en otras aleaciones como: pérdida de níquel, estaño y cromo a partir de aleaciones de cobre, de hierro a partir de hierro fundido, de níquel a partir de los aceros y cobalto a partir de estelita. ^[10]

Tasa de corrosión

La velocidad de corrosión o la velocidad de eliminación del material como consecuencia química, es un parámetro importante, se la puede expresar como la tasa de penetración de corrosión (CPR) ó como la pérdida de espesor de material por unidad de tiempo, de acuerdo a la siguiente expresión: ^[8]

$$CPR = \frac{KW}{\rho At} \quad \text{Ec 2.9}$$

Donde:

K: constante, K=534 para que CPR sea en mpy (donde 1 mil = 0.001in) y K=87.6 si se desea en mm/yr (milímetros por año)

W: pérdida de peso del espécimen (mg)

t: tiempo de exposición (h)

ρ : densidad del material (g/cm^3)

A: área de exposición (plg^2), para K=87.6 el área debe estar en (cm^2)

Ensayos de corrosión

Existen muchas pruebas para establecer la fiabilidad de los recubrimientos protectores sobre sustratos metálicos, las organizaciones activas que se dedican al desarrollo y estandarización de pruebas de corrosión para recubrimientos incluyen a: ASTM, NACE Sociedad Internacional de Ingenieros Automotrices (SAE), la Organización Internacional de Estándares (ISO), sistemas internacionales como (DIN) y demás otras entidades.

Los métodos de prueba ampliamente utilizados son: ^[6]

- Pruebas de campo
- Pruebas de servicio simuladas
- Ensayos de laboratorio acelerados, por ejemplo, ensayos de pulverización de sal, ensayos de humedad y pruebas electroquímicas.

El Anexo F2, enumera las pruebas seleccionadas utilizadas para determinar la eficacia de los recubrimientos en ambientes corrosivos.

2.1.2.6.- Norma ASTM B-117 para ensayo de corrosión

El ensayo de nebulización salina es quizás el más comúnmente usado para probar revestimientos orgánicos e inorgánicos. La duración de este ensayo puede variar de 8 a 3000h, dependiendo del tipo de producto del recubrimiento. Se utiliza una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 5% que no contiene más de 200 ppm de sólidos totales y con un rango de pH de 6.5 a 7.2 cuando se atomiza. La temperatura de la cabina de sal se controla para mantener 35 ± 1.1 ó -1.7 °C dentro de la zona de exposición de la cabina cerrada. ^[11]

Todos los parámetros del ensayo, la preparación de las probetas, la composición de la solución salina, la posición de las probetas durante el ensayo, el arreglo de los colectores de niebla (Figura 2.24), y demás variables están detallados en la norma ASTM B-117.

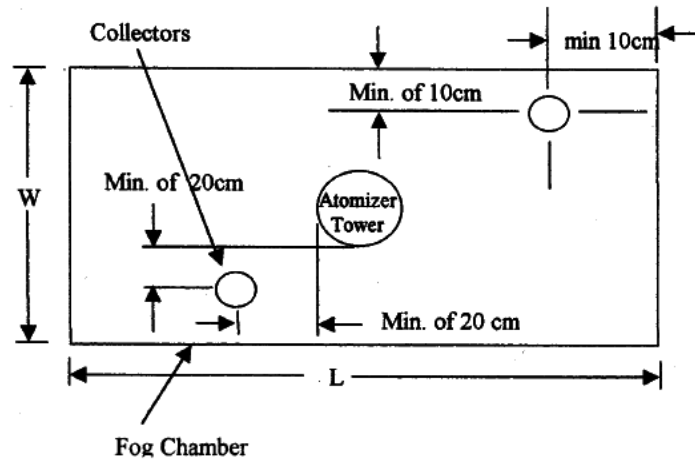


Figura 2. 24. Arreglo de los colectores de niebla

Fuente: ASTM B-117-03 ^[11]

2.1.2.7.- Técnica de proyección térmica

La técnica de proyección térmica (thermal spray) se utiliza para aumentar la vida útil de componentes de máquinas y dispositivos que están sometidos a altas exigencias en ambientes de desgaste, corrosión y temperaturas elevadas. ^[5]

Las necesidades de utilizar esta técnica va dirigida a: restaurar medidas, obtener tolerancias precisas, modificar las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de los diferentes componentes industriales, con el objetivo de prolongar su vida útil, aumentar su funcionamiento, y reducir los costos de producción y de mantenimiento; favoreciendo también a una alta productividad y bajo impacto ambiental.

La técnica consiste en alimentar, calentar y proyectar un material como partícula individual en forma de gotas sobre una superficie (atomización). El equipo que permite la proyección térmica genera el calor necesario mediante gases combustibles o arco eléctrico. Los materiales son calentados, fundidos y acelerados hacia el sustrato usando gas comprimido.

Las partículas proyectadas se impactan en el sustrato, aplastándose y formando placas delgadas de geometría lenticular “splats” que se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas (deposición), produciendo un recubrimiento de

estructura laminar, que no es homogéneo y comúnmente contiene cierto grado de porosidad y óxidos en el caso de proyección de metales como se observa en la Figura 2.25.

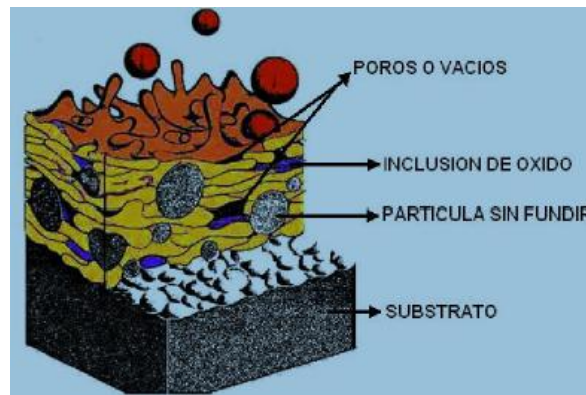


Figura 2. 25. Capa rociada térmicamente

Fuente: Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos ^[5]

Con este proceso de proyección térmica se consiguen depósitos con espesores desde pocas micras hasta varios milímetros, y se alcanzan temperaturas medias de trabajo que no comprometen el sustrato, comparado con el proceso de soldadura que involucra elevadas temperaturas, dilución y distorsiones geométricas.

Componentes de la proyección térmica

Fuente de energía: puede ser con gases o energía eléctrica, necesarios para la fusión y transporte del material de aporte hacia el sustrato.

Material de aporte: pueden ser metálicos, cerámicos, polímeros o compuestos presentados usualmente en forma de polvos, alambres o barras; aplicados bajo condiciones atmosféricas normales o especiales.

Unidad de proyección: procesa la energía emitida por la fuente de energía para generar la fuente de calor (llama o arco), y es en donde se incorpora y se funde el material a depositar.

Sustrato: es el material en donde se deposita el recubrimiento, luego de haberse preparado mediante una serie de pasos para lograr una superficie limpia y con rugosidad adecuada.

La Figura 2.26 muestra los componentes de la técnica de proyección térmica.

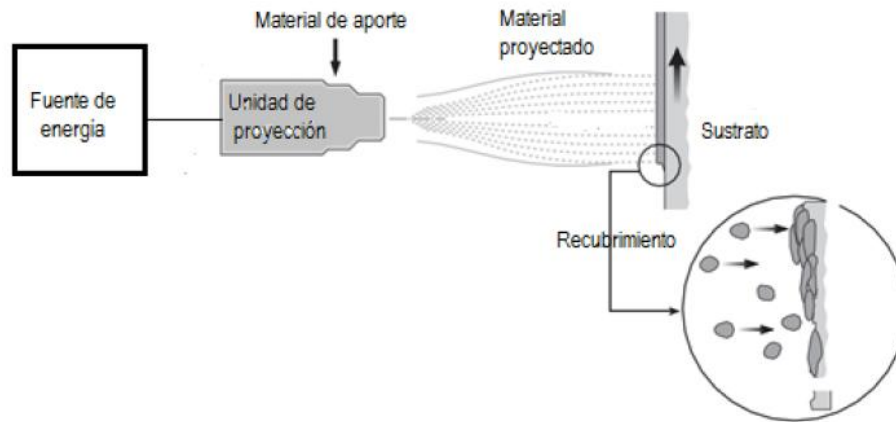


Figura 2. 26. Componentes de la técnica de proyección térmica
Fuente: Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos ^[5]

Tipos de proyección térmica ^[5]

Por combustión: se subdivide en:

- Llama (flame spray), utiliza como material de aporte polvo o alambre
- Proyección a partir de oxígeno combustible a alta velocidad HVOF (High Velocity Oxy Fuel)
- Antorcha de detonación (Detonation spray)

Eléctrico: se subdivide en:

- Arco eléctrico
- Arco eléctrico por propulsión (Jet)

Por plasma: se subdivide en

- Plasma de arco no transferido (PSP o Plasma Spray)
- Plasma de arco transferido (PTA o Plasma Transferred Arc)

La selección de la técnica más apropiada lo determina factores como el material deseado en el recubrimiento, requerimientos de desempeño, sitio de aplicación, tamaño de la pieza y factor económico.

Proyección térmica por llama

Proyección a baja temperatura: se lleva a cabo con equipos de llama oxiacetilénica y material de aporte en forma de polvo que es suministrado y alimentado a la antorcha desde el contenedor ubicado en la parte superior de ésta, luego es aspirado por la succión en forma de oxígeno al pasar por un venturi. El polvo es transportado hacia la llama donde es fundido y proyectado hacia el sustrato por los gases de combustión. ^[5] La Figura 2.27 muestra un equipo de proyección por llama que suministra polvos.

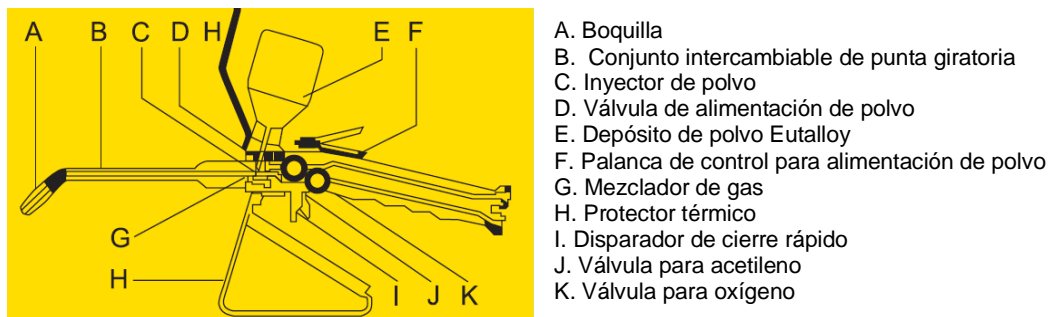


Figura 2. 27. Equipo de proyección térmica por llama y polvos

Fuente: Catálogo EUTALLOY SUPERJET-S

Proyección a alta temperatura: se realiza con un equipo similar al anterior, se diferencia en que la alimentación del material de aporte (polvo) es controlado por una palanca manual (F), luego es arrastrado por los gases hasta la boquilla (A), donde alcanza el cono de la llama y se funde; finalmente las partículas proyectadas alcanzan la pieza, que es precalentada por la misma llama produciéndose una unión fuerte entre el sustrato y la capa base. ^[5]

Evaluación de los revestimientos

Las propiedades de un revestimiento efectuado por proyección térmica van a depender directamente de la adhesión entre la capa y el sustrato, así como de la cohesión entre las partículas depositadas. Estas propiedades están influenciadas por la cantidad de defectos presentes en el revestimiento tales como: partículas sin fundir, óxidos e inclusiones, poros, esfuerzos residuales, grietas y microgrietas.

Entre las propiedades disponibles para caracterizar los revestimientos efectuados por proyección térmica se tiene:

- Adhesión/cohesión: ensayo de tracción, cinta, doblez y cizallamiento
- Dureza: micro y macrodureza
- Desgaste: ensayos de resistencia al desgaste
- Análisis metalográfico
- Ensayos no destructivos

2.1.2.8.- Preparación de la superficie

La preparación de la superficie del sustrato es muy importante para garantizar la calidad de adherencia que tenga la película depositada, dado que los mecanismos de anclaje entre el recubrimiento y el sustrato son completamente mecánicos. Los factores a tomar en cuenta son:

Limpieza: es importante que la superficie donde se aplica el revestimiento esté limpia y libre de humedad, libre de capas de óxido, grasa, aceites y pintura; para esto es posible utilizar métodos químicos como ácidos decapantes, detergentes, disolventes o limpieza mecánica con abrasivos.

Rugosidad: este es un factor importante, ya que al aumentar la rugosidad crecen las fuerzas de adhesión entre la película y el material base, así como sus propiedades.

Precaentamiento de la superficie: esto aumenta significativamente la adhesión del revestimiento, ya que previene la condensación del vapor de agua, retarda el enfriamiento de la partícula depositada y mejora el contacto partícula-metal, promoviendo así la unión térmica. ^[5]

2.2.- FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

El presente trabajo investigativo será desarrollado mediante el paradigma crítico-propositivo con el fin de indicar las maneras adecuadas para la solución del problema, así como también facilitar de una manera entendible el desarrollo y comprobación de la investigación.

El direccionamiento para solucionar el problema está centrado en el análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y la influencia que tiene este en la resistencia al desgaste superficial.

No se descartan posibles cambios en el transcurso del desarrollo de la investigación por razones de la intervención directa del factor humano, así como también las facilidades tecnológicas que en algún momento pueden estar limitadas de uso o de existencia.

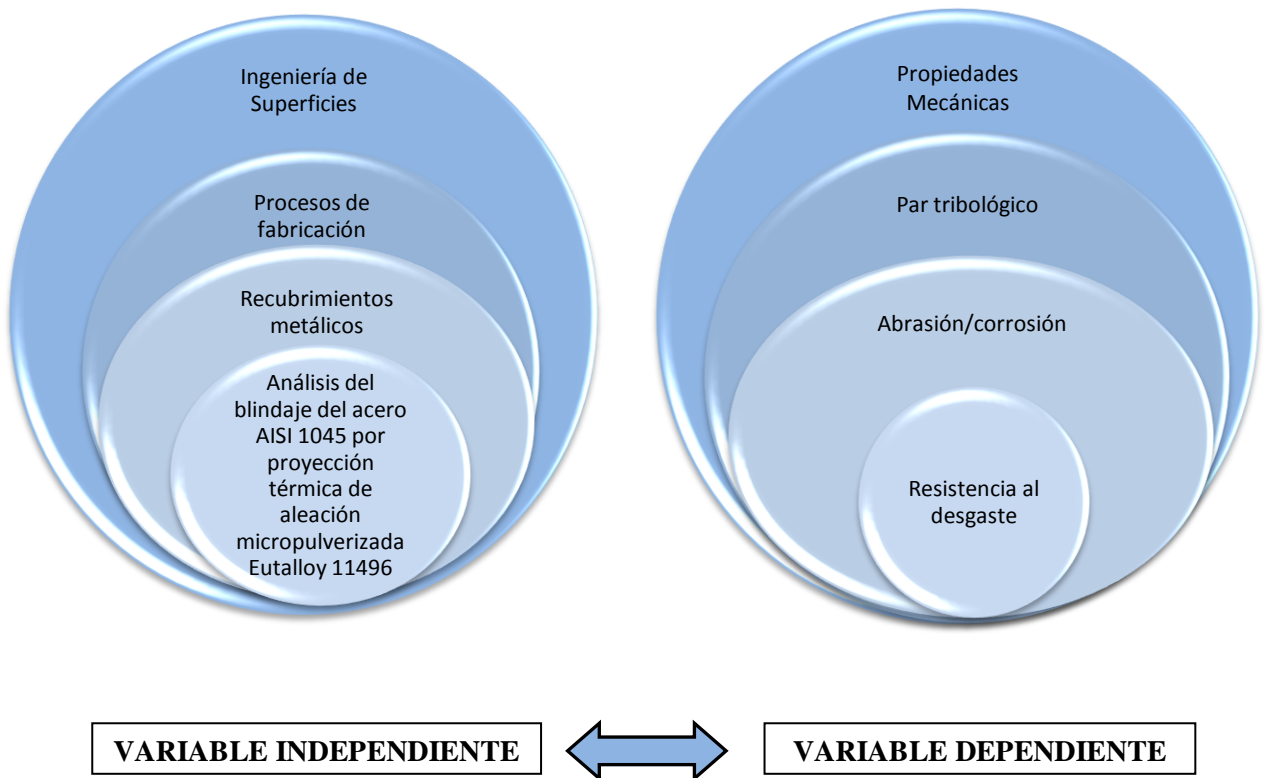
2.3.- FUNDAMENTACIÓN LEGAL

El presente trabajo investigativo se desarrolló basado en la siguiente normativa:

- ASTM G-65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus
- ASTM B-117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens

- ASTM E 112: Standard Test Methods for Determining Average Size
- ASTM E-11: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves

2.4.- CATEGORIAS FUNDAMENTALES



2.5.- HIPÓTESIS

El blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 influye en la resistencia al desgaste de la superficie.

2.6.- SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

2.6.1.- VARIABLE INDEPENDIENTE

Análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada 11496

2.6.2.- VARIABLE DEPENDIENTE

Resistencia al desgaste superficial

2.6.3.- TÉRMINO DE RELACIÓN

Influye

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.- ENFOQUE

Este trabajo de investigación va a presentar datos cuantitativos y cualitativos, orientados al análisis de la resistencia al desgaste y corrosión que tendrá un acero AISI 1045 blindado por la técnica de proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496.

3.2.- MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación está estructurada en las siguientes modalidades de investigación:

3.2.1.- De campo

Se hace necesaria esta modalidad de investigación debido a que la metodología para el análisis de la resistencia al desgaste y corrosión se lo hará a partir de un elemento mecánico de un molino de caña llamado virador, cuyo material de construcción es acero AISI 1045, y en él se aplicará un recubrimiento “blindaje” por medio de la técnica de proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496.

3.2.2.- Bibliográfico

Se utilizará la modalidad bibliográfica por razones de obtener información en libros, folletos, revistas, notas técnicas e internet, necesarios para estructurar un completo trabajo de investigación. De tal manera que se detalle el procedimiento para realizar el análisis de la resistencia al desgaste y corrosión en el acero AISI 1045 perteneciente a un virador de un molino de caña, al cual se le hará un blindaje por proyección térmica de polvos metálicos.

3.2.3.- Experimental

Esta modalidad de investigación es la más importante para el desarrollo del presente trabajo investigativo, por razones que por medio de ella se llevaran a cabo los ensayos necesarios para realizar el análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y la influencia que tendrá en la resistencia al desgaste.

3.3.- NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación empleará los siguientes tipos de investigación:

- Exploratoria
- Descriptiva
- Asociación de variables

3.3.1.- Exploratoria

El objetivo de este tipo de investigación está encaminado a examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido antes abordado en el Ingenio Azucarero San Juan.

Esta investigación es exploratoria con el fin de realizar el análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y su influencia con la resistencia al desgaste superficial; determinando así los posibles beneficios que tendrá el Ingenio Azucarero San Juan si llegase a implementar este tipo de técnicas en su programa de mantenimiento del área de molinos.

3.3.2.- Descriptiva

De igual manera ocupa este nivel de investigación por efecto de describir el procedimiento correcto y la técnica necesaria para realizar el blindaje del acero AISI 1045 por proyección

térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496, para la consecutiva obtención de resultados confiables y en lo posterior la interpretación de resultados relacionados a la resistencia al desgaste que tendrá este acero.

3.3.3.- Asociación de variables

Este tipo de investigación tiene como propósito asociar las variables y de esta manera poder determinar la influencia que tiene el realizar un blindaje al acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 en la resistencia al desgaste y corrosión de este tipo de acero.

3.4.- POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1.- Población

El análisis del blindaje por proyección térmica permitirá definir la cantidad de probetas de acero AISI 1045 para determinar la resistencia al desgaste abrasivo y resistencia a la corrosión, de acuerdo a las normas ASTM G-65 y ASTM B-117, respectivamente; y según lo siguiente:

- Probetas de acero AISI 1045 blindadas por la técnica de proyección térmica por llama de aleación metálica micropulverizada tipo Eutalloy 11496, mismas que serán caracterizadas por resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión, dureza, microscopía electrónica de barrido, microscopía óptica y metalografía.

3.4.2.- Muestra

La muestra está considerada de acuerdo a los siguientes casos de estudio:

- Sustrato: probeta de acero AISI 1045
- Temperatura de precalentamiento: 200°C y 400°C

- Preparación de la superficie: sandblasting, granallado y pulido
- Ensayo de desgaste por abrasión
- Ensayo de corrosión en cámara de niebla salina: 100 horas y 200 horas

De acuerdo a lo anterior la Tabla3.1 muestra las combinaciones posibles para la muestra.

Tabla 3. 1. Muestra de probetas.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

PATRON	PROBETA	Mat Sustrato	Recubrimiento	°T Precalentamiento	ENSAYOS									
					Preparación Superficial			Dureza	Abrasión	Corrosión		SEM/ESPECTROMETRIA		Difractometría
					Arena	Granalla	Pulido			100h	200h	Imágenes	% Elementos	
	01	AISI 1045						X	X			X	X	X
	02	AISI 1045						X	X					
	03	AISI 1045						X		X		X	X	X
	04	AISI 1045						X		X				
	05	AISI 1045						X			X	X	X	X
	06	AISI 1045						X			X			
ABRASIÓN	07	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X	X			X	X	X
	08	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X	X					
	09	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X	X					
	10	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X	X			X	X	X
	11	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X	X					
	12	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X	X					
	13	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X	X			X	X	X
	14	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X	X					
	15	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X	X					
	16	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X	X			X	X	X
	17	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X	X					
	18	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X	X					
	19	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X	X			X	X	X
	20	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X	X					
	21	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X	X					
	22	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X	X			X	X	X
23	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X	X						
24	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X	X						
CORROSIÓN	25	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X		X		X	X	
	26	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X		X				
	27	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X			X	X	X	
	28	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200	X			X			X			
	29	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X		X		X	X	
	30	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X		X				
	31	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X			X	X	X	
	32	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400	X			X			X			
	33	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X		X		X	X	
	34	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X		X				
	35	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X			X	X	X	
	36	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200		X		X			X			
	37	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X		X		X	X	
	38	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X		X				
	39	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X			X	X	X	
	40	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400		X		X		X				
	41	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X		X		X	X	
	42	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X		X				
	43	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X			X	X	X	
	44	AISI 1045	EUTALLOY 11496	200			X	X			X			
	45	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X		X		X	X	
	46	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X		X				
	47	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X			X	X	X	
	48	AISI 1045	EUTALLOY 11496	400			X	X			X			

3.5.- OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.5.1.- Variable independiente

Análisis del blindaje de acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Blindaje de proyección térmica por llama Es una técnica de recubrimiento que se realiza con una antorcha quien se encarga de fundir un polvo metálico y proyectarlo a la superficie de la pieza desgastada.	Preparación de la superficie de la probeta	Rugosidad	Ra (mils, micras)	Observación y medición directa
	<ul style="list-style-type: none"> • Pulido mecánico • Sandblasting • Granallado 			
	Pre calentamiento de la probeta de acero AISI 1045	Temperatura	200°C 400°C	Observación y medición directa
	Película de blindaje	Espesor	e (milímetros)	Observación y medición directa

3.5.2.- Variable dependiente

Resistencia al desgaste superficial

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS / ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Resistencia al desgaste</p> <p>Propiedad que permite a un material resistir y mantener su apariencia original al ser frotado con otro objeto o deteriorado por el medio.</p>	Dureza superficial	¿Cuál es la dureza superficial del recubrimiento de aleación micropulverizada Eutalloy 11496?	Dureza Brinell	Técnicas de observación directa Durómetro portátil profesional
	Desgaste abrasivo	¿Cuál es la resistencia al desgaste abrasivo del recubrimiento de aleación micropulverizada Eutalloy 11496?	Pérdida de volumen (mm ³)	Técnicas de observación, manuales, catálogos Equipo de acuerdo a ASTM G-65
		¿Cuál es el coeficiente de desgaste abrasivo?		
	Análisis superficial	¿Qué tipos de mecanismos de desgaste abrasivo se produjeron en el acero AISI 1045 con y sin blindaje?	Microscopio (micrografías)	Técnicas de observación/ SEM
	Desgaste corrosivo	¿Cómo se caracteriza el sustrato y el blindaje?	% C, Resistencia Tracción Tamaño grano Dureza HB Defectología	Técnicas de observación, manuales, catálogos
¿Cuál es la resistencia a la corrosión del recubrimiento de aleación micropulverizada Eutalloy 11496?		Tasa de corrosión (mm/año)	Técnicas de observación/ Cámara de niebla salina de acuerdo a la ASTM B-117	
		¿Cuál es el tipo de corrosión en el blindaje?		Técnicas de observación

3.6.- RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Toda la información correspondiente al análisis del blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 y la influencia que tiene éste con la resistencia al desgaste, será registrada en los formatos físicos adecuados, así como también se dispondrá de archivos fotográficos, electrónicos y digitales.

Toda la información tabulada será interpretada y verificada con la hipótesis planteada en el presente trabajo investigativo.

3.7.- PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Mediante el registro de los datos obtenidos relacionados a la resistencia al desgaste del acero AISI 1045 blindado con proyección térmica de polvo micropulverizado tipo Eutalloy 11496, se podrán sacar las respectivas conclusiones; las herramientas útiles para este fin son el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, el ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, el ensayo de dureza, el análisis de las micrografías tomadas por SEM, el análisis metalográfico del sustrato y la caracterización del blindaje.

Con las herramientas antes descritas se generarán tablas y gráficas que permitirán un adecuado manejo de la información.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1.1.- PROCESO DE OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La obtención de los resultados y el respectivo análisis seguirá la siguiente secuencia:

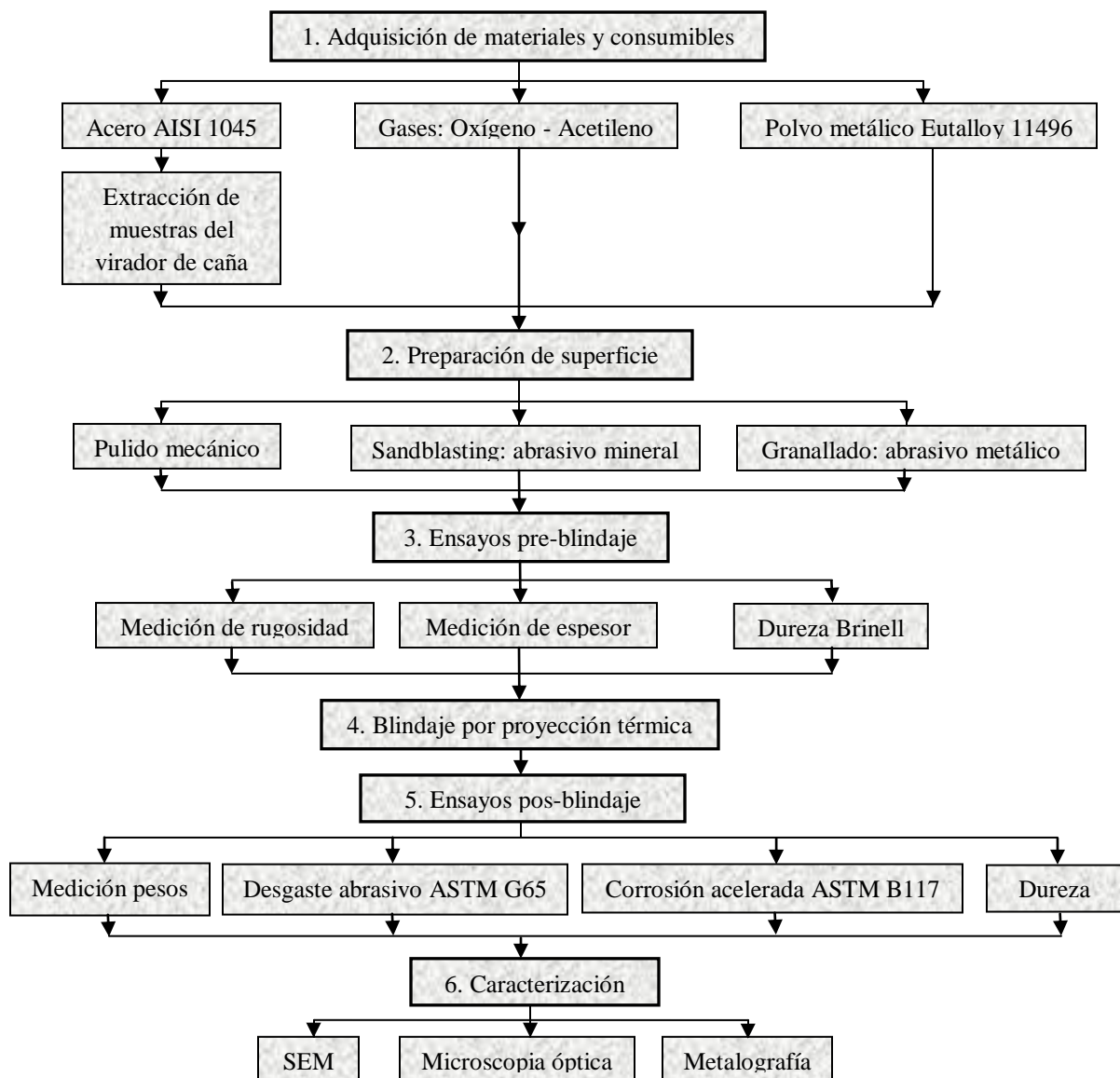


Gráfico 4.1 Diagrama de flujo para la obtención de los resultados

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.2.- PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.2.1.- EXTRACCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS

Las probetas fueron obtenidas a partir del virador de caña del molino N° 1 (Figura 4.1), del Ingenio Azucarero San Juan; este virador fue utilizado en la zafra del 2016 y precisamente se lo ha desechado por el desgaste que presentó en la superficie de contacto con las masas, después de terminada la zafra.



Figura 4. 1. Extracción de muestras de acero AISI 1045 de un virador de molino de caña para la fabricación de probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Como se observa en la Figura 4.1, la extracción inicial de muestras de acero AISI 1045 se realizó mediante el uso de discos de corte con amoladora, esto con la finalidad de obtener bloques de acero para realizar un segundo corte en la cuchilla eléctrica de vaivén y finalmente un tercer corte con sierra manual en un banco con entenalla. (Figuras 4.2a y 4.2b, respectivamente).

El motivo por el cual no se realizaron todos los cortes con amoladora hasta obtener las probetas, es porque este tipo de cortes generan temperatura, y es un parámetro que puede influir en las propiedades mecánicas del material y en los resultados; inclusive para evitar esto, la cuchilla eléctrica de vaivén utiliza un líquido refrigerante.



Figura 4. 2. Fabricación de probetas mediante el uso de: a) Sierra eléctrica de vaivén, b) Sierra manual

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Las probetas fueron fabricadas acorde a la necesidad de los ensayos, sean estos para el caso del ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G-65 (Anexo A1), para el caso de las probetas para el ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina según la norma ASTM B-117 (Anexo A2) y acorde a la distribución que presentan las hileras que sujetan las probetas dentro de la cámara de niebla salina; a partir de estas probetas también serán extraídas las respectivas muestras que se necesitan en la caracterización en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y el análisis metalográfico.

La geometría de las probetas es como muestra la Figura 4.3

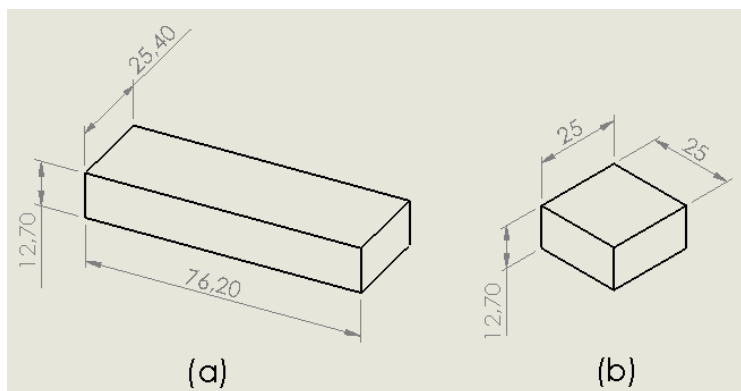


Figura 4. 3. Geometría de probetas: a) Para ensayo de abrasión, b) Para ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Las probetas quedan designadas e identificadas de la siguiente manera:

- Probetas para el ensayo de desgaste por abrasión según la preparación de la superficie
 - ✓ Pn (pulido mecánico): P1, P2, P3, P4, P5, P6
 - ✓ Sn (sandblasting mineral): S1, S2, S3, S4, S5, S6
 - ✓ Gn (granallado metálico): G1, G2, G3, G4, G5, G6
 - ✓ En (sustrato): E1, E2
- Probetas para el ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina y según el acabado superficial
 - ✓ Pulido mecánico: C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8
 - ✓ Sandblasting mineral: C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16
 - ✓ Granallado metálico: C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23, C24
- Probetas para la caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y análisis metalográfico, según la preparación superficial
 - ✓ Pulido mecánico: ED1, ED2, LS1
 - ✓ Sandblasting mineral: ED3, ED4, LS2
 - ✓ Granallado metálico: ED5, ED6, LS3

4.2.2.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Se han establecido tres tipos de preparación superficial:

- ***Pulido mecánico:*** se lo realiza con una amoladora y un disco abrasivo de grano de óxido de circonio 120 que gira hasta 13300 RPM (Figura 4.4a), es un disco que permite la remoción 3 veces más que los discos abrasivos comunes.

Este pulido mecánico se lo realizó en un banco de entenalla como muestra la Figura 4.4b, y las probetas al finalizar el proceso son las que muestra la Figura 4.5.

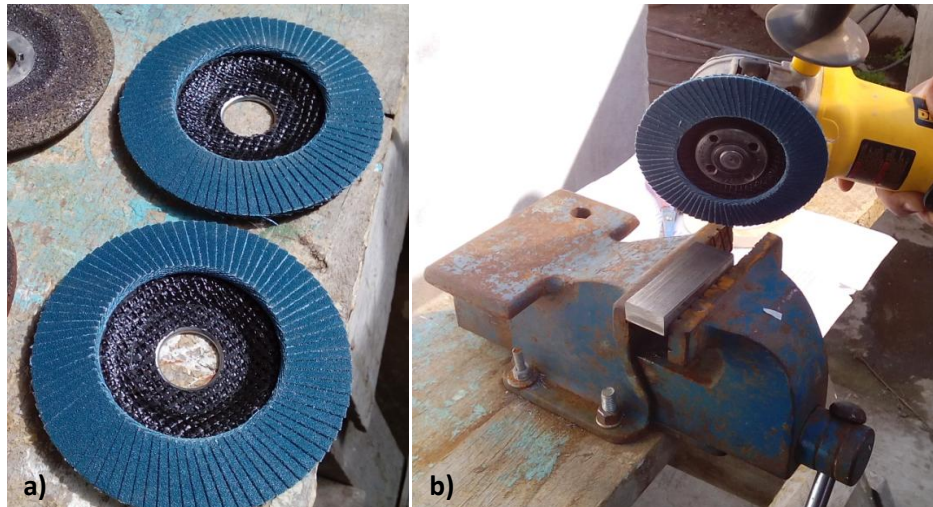


Figura 4. 4. a) Discos abrasivos de grano de circonio 120, b) Pulido mecánico de probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 5. Probetas para ensayo de desgaste por abrasión preparadas superficialmente mediante pulido mecánico

Fuente: Autor: Jorge Paredes

- **Sandblasting mineral:** para este proceso se analizó inicialmente que al tratarse de probetas de pequeñas dimensiones, la fuerza que ejerce el chorro de material abrasivo sobre la superficie de la probeta, haría que ésta se mueva de su lugar; es por eso que a todas las probetas se les realizó un sistema de anclaje posterior sobre una plancha de acero, como se muestra en la Figura 4.6. Esta plancha debido a su peso evitará que las probetas se muevan y permita así una distribución uniforme del chorro de material abrasivo sobre la superficie a preparar.

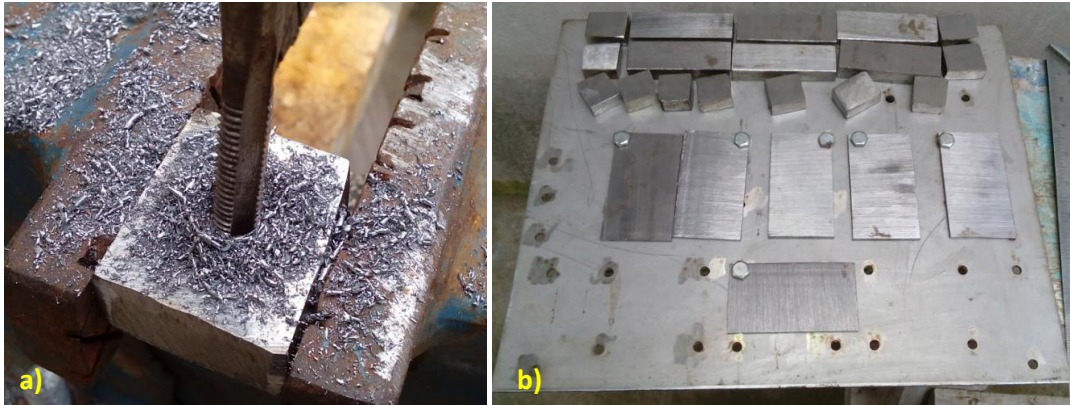


Figura 4. 6. a) Perforado y machuelado de probetas para anclaje posterior, b) Probetas sujetas en placa previo al sandblasting

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los equipos utilizados para el sandblasting mineral fueron un compresor de aire de 125 psi (Figura 4.7a), una tolva de alimentación del material abrasivo de 1.0 MPa y 0.2 m³ de capacidad (Figura 4.7b) y el juego de mangueras de alta presión.

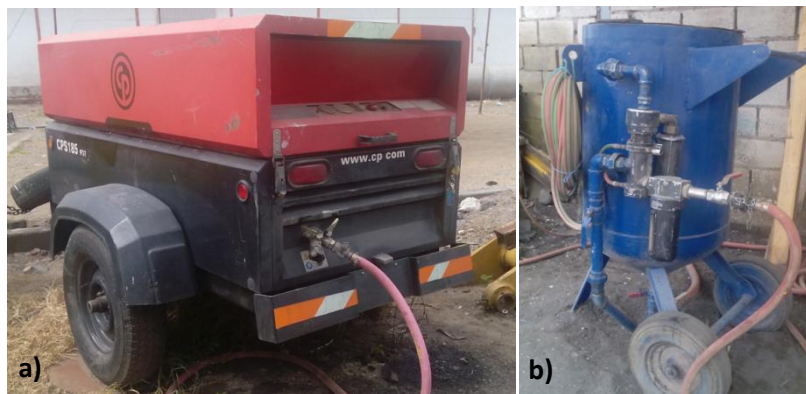


Figura 4. 7. a) Compresor de aire modelo CPS-185, b) Tolva de alimentación de material abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El abrasivo mineral es de naturaleza volcánica con la siguiente composición química y morfología (Figura 4.8).

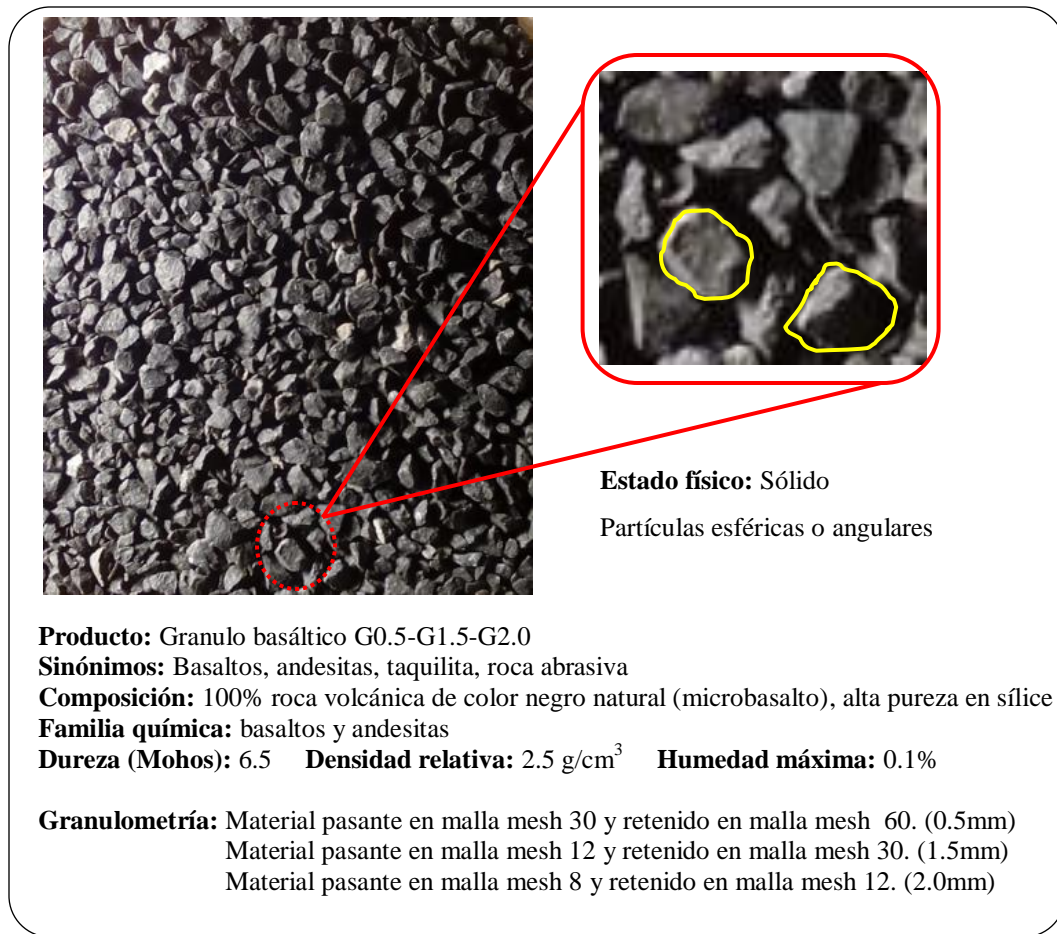


Figura 4. 8. Morfología del abrasivo mineral y propiedades físico-químicas (ANEXO B1)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El proceso de sandblasting mineral se realizó como muestra la Figura 4.9 y las probetas con el acabado superficial después del proceso se muestran en la Figura 4.10.



Figura 4. 9. Proceso de sandblasting mineral en probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 10. Probetas con preparación superficial por sandblasting para ensayo de desgaste por abrasión

Fuente: Autor: Jorge Paredes

- **Granallado metálico:** es un proceso que se realizó con los mismos equipos utilizados en el sandblasting mineral, incluyendo la placa metálica que sujeta a todas las probetas para soportar el efecto del chorro con material abrasivo; en este caso pequeñas partículas metálicas, cuya composición química y morfología se muestran en la Figura 4.11

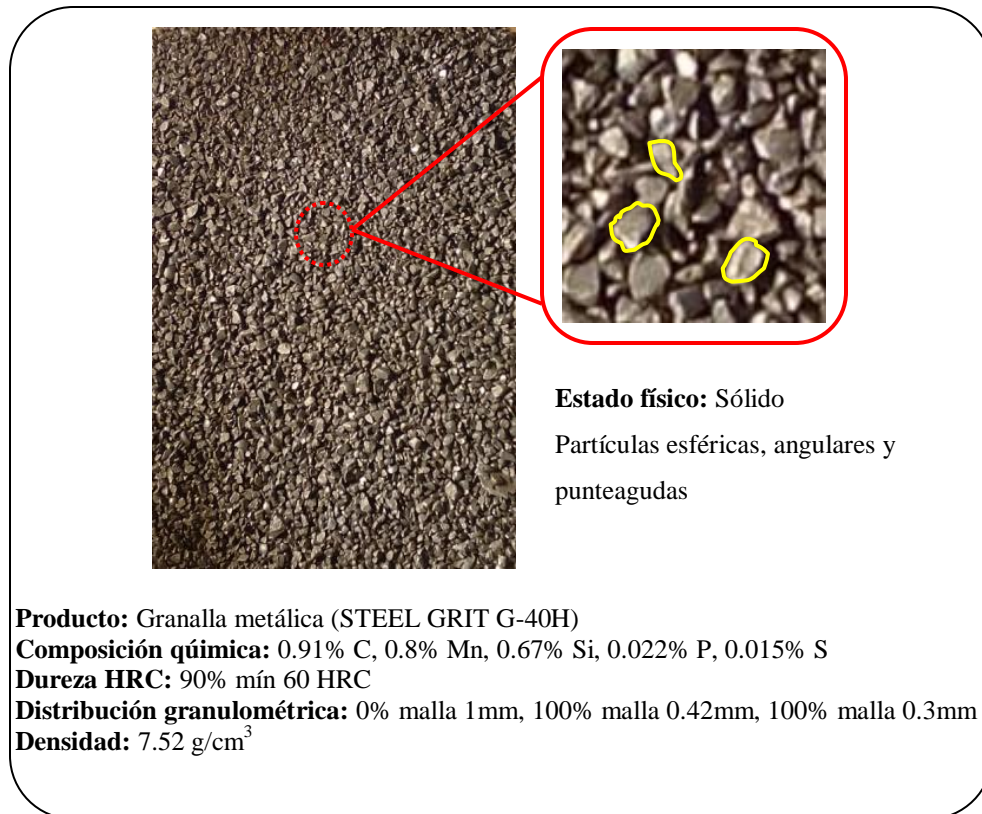


Figura 4. 11. Composición química del abrasivo metálico y morfología (ANEXO B2)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El proceso de granallado metálico y disposición de las probetas en la placa se muestran en la Figura 4.12, así mismo la Figura 4.13, muestra las probetas con el acabado superficial final.



Figura 4. 12. Proceso de granallado metálico en probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 13. Probetas con preparación superficial de granallado metálico para ensayo de desgaste abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.2.3.- MEDICIONES DE RUGOSIDAD

Las mediciones de rugosidad para todas las probetas en los tres tipos de preparación superficial especificados, se realizaron mediante el uso de un equipo palpador ELCOMETER 123 (Figura 4.14), mismo que viene dotado con un patrón de vidrio para calibrarlo en rugosidad cero y así poder iniciar con las mediciones. La Figura 4.15 muestra la toma de medidas de rugosidad en las superficies de las probetas para el ensayo de desgaste por abrasión, previo al proceso de blindaje por proyección térmica.



Figura 4. 14. Calibración del medidor de rugosidad ELCOMETER 123 sobre un patrón de vidrio de rugosidad cero

Fuente: Autor: Jorge Paredes

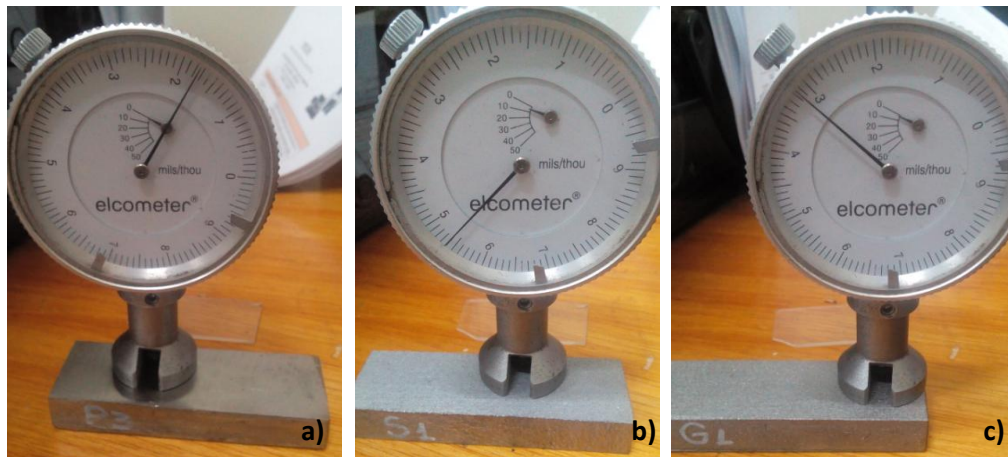


Figura 4. 15. Mediciones de rugosidad en probetas con diferente preparación superficial: a) Pulido mecánico, b) Sandblasting mineral, c) Granallado metálico

Fuente: Autor: Jorge Paredes

De acuerdo a esto se tiene la Tabla 4.1, que muestra los valores de rugosidad para cada una de las probetas en unidades de mils y micras; en ella se clasifican las probetas de acuerdo a la preparación superficial que recibieron. Cabe señalar que la conversión de mils a micras es equivalente a: 1 mil = 25.4 micras (μm).

Tabla 4. 1. Valores de rugosidad en las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, según la preparación superficial.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

RUGOSIDAD													
Probeta	MEDICIONES										\bar{X}	Promedio mils	Micras
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
P1	0,6	1,4	1,4	1,3	1,2	1,3	2,0	1,4	1,9	1,1	1,36	1,38	34,93
P2	0,6	0,5	2,2	0,7	2,1	0,4	0,4	0,6	2,0	1,3	1,08		
P3	1,7	3,0	1,1	2,5	2,6	2,4	1,8	2,2	2,0	1,2	2,05		
P4	0,9	1,2	1,9	1,6	0,8	1,0	0,6	1,4	1,9	1,3	1,26		
P5	0,4	1,5	0,6	2,0	1,9	1,5	1,6	1,2	1,0	1,6	1,33		
P6	1,6	1,1	1,3	1,7	1,1	0,3	1,3	0,8	1,9	0,6	1,17		
S1	2,9	5,4	5,9	2,1	3,4	5,5	5,1	6,8	6,4	5,8	4,93	4,77	121,20
S2	3,5	5,5	1,9	5,5	5,9	4,0	5,5	5,5	4,6	4,8	4,67		
S3	3,4	4,0	6,0	5,1	3,8	4,5	4,0	4,3	4,0	4,9	4,40		
S4	6,0	4,2	4,5	6,5	5,3	5,7	5,3	5,9	5,6	3,2	5,22		
S5	6,2	5,4	6,2	5,6	5,1	3,6	4,9	5,5	4,9	3,5	5,09		
S6	3,9	3,8	3,4	3,5	3,6	4,3	4,0	5,8	6,4	4,5	4,32		
G1	2,0	3,1	2,5	2,4	1,8	2,1	3,7	2,1	2,2	2,1	2,40	1,70	43,26
G2	3,6	3,2	2,5	2,6	3,5	2,9	3,4	3,0	3,2	2,0	2,99		
G3	3,4	3,5	2,9	3,3	3,3	3,6	3,0	3,4	2,5	3,2	3,21		
G4	3,4	2,7	2,5	2,1	2,9	2,8	3,2	2,3	2,4	3,5	2,78		
G5	2,4	3,7	2,3	2,8	2,5	3,2	2,9	3,0	3,3	2,8	2,89		
G6	2,2	3,2	3,0	2,3	2,2	2,5	2,6	3,4	3,5	2,7	2,76		

4.2.4.- MEDICIONES DE DUREZA INICIAL BRINELL

Es necesario conocer la dureza del material de las probetas previo al procedimiento de blindaje por proyección térmica, para esto, se utilizó el equipo de medición de dureza DIGIMESS DP 300 (Figura 4.16), mismo que está equipado con una lista de materiales según sea el caso y con la escala de dureza a medir; para este ensayo se lo configura como material acero y escala de dureza Brinell.

Previamente el equipo deberá calibrarse con el bloque patrón de acero que viene equipado como muestra la Figura 4.17. El bloque patrón indica que tiene una dureza de 797.4 HL \pm 5, la medición al calibrarlo muestra 799 HL.



Figura 4. 16. Equipo profesional de medición de dureza DIGIMESS DP 300

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 17. Calibración del equipo de medición de dureza DIGIMESS DP 300. El patrón indica una dureza de 797.4 HL \pm 5, la medida tomada muestra 799 HL

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Según lo indicado las mediciones de dureza Brinell que presenta el material AISI 1045 de las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión (Figura 4.18) y previo el proceso de blindaje por proyección térmica, se muestran en la Tabla 4.2.

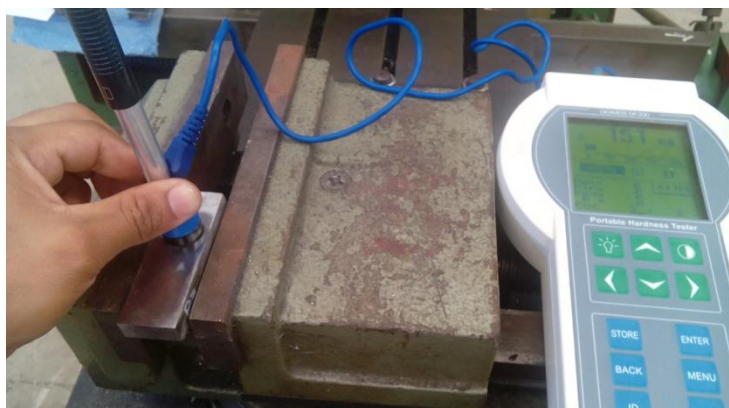


Figura 4. 18. Registro de dureza Brinell en probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes


Tabla 4. 2. Valores de dureza Brinell de las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, previo al proceso de blindaje.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

DUREZA INICIAL BRINELL (HB)											
Probeta	MEDICIONES										\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
P1	125	130	157	144	154	163	140	140	136	133	142,20
P2	163	163	156	166	143	136	160	168	147	165	156,70
P3	151	150	138	129	104	143	140	153	126	145	137,90
P4	138	141	138	151	148	137	144	124	143	136	140,00
P5	146	136	154	153	147	158	120	145	141	148	144,80
P6	156	151	137	129	125	130	130	144	162	124	138,80
S1	141	160	140	126	121	156	109	136	143	147	137,90
S2	132	144	126	132	141	136	132	137	143	153	137,60
S3	168	137	110	128	128	145	163	138	140	137	139,40
S4	140	160	119	129	151	153	166	130	143	136	142,70
S5	144	180	136	169	128	151	140	156	163	153	152,00
S6	141	163	144	166	154	153	141	162	168	138	153,00
G1	143	160	179	136	143	128	138	140	160	140	146,70
G2	168	174	158	162	163	137	158	157	136	140	155,30
G3	169	132	150	158	195	174	185	200	150	206	171,90
G4	132	137	157	180	141	160	136	169	165	133	151,00
G5	180	137	129	177	150	199	151	141	207	148	161,90
G6	147	144	168	133	140	124	133	141	166	125	142,10
E1	147	140	177	160	141	171	124	143	133	128	146,40
E2	147	162	177	154	160	133	121	143	144	129	147,00

4.2.5.- BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA

Primero es indispensable configurar las presiones de gases de acetileno y oxígeno que requiere el equipo de proyección térmica SUPERJET-S EUTALLOY, estas se indican en la placa que se encuentra en la antorcha como muestra la Figura 4.19; las presiones a configurar de oxígeno y acetileno van de acuerdo a la boquilla que se utiliza, en este caso, se utilizará la boquilla de flujo medio B3S que indica configurar la presión de oxígeno a 37 PSI y la presión de acetileno a 9 PSI. Estas presiones se configuran en los manómetros de los envases como muestra la Figura 4.20.



Tip assembly	Oxygen		Acetylene	
	bar	psi	bar	psi
A0 S	1,5	22	0,5	7,5
A1 S	2,0	30	0,5	7,5
A2 S	2,5	37	0,5	7,5
B3 S	2,5	37	0,6	9,0
B4 S	2,5	37	0,6	9,0
C5 S	4,0	60	1,0	15,0

Figura 4. 19. Presiones de trabajo establecidas para los gases, oxígeno y acetileno en el equipo de proyección térmica SUPERJET-S EUTALLOY

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 20. Configuración de la presión de gases para el proceso de proyección térmica, acetileno a 9 PSI y oxígeno a 37 PSI

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La aleación micropulverizada a utilizar en el proceso de proyección térmica es la EUTALLOY 11496, que es una aleación a base de Níquel y que debido a sus componentes se pretende proteger las superficies contra el desgaste y la corrosión. Las propiedades físico-químicas y algunos aspectos de morfología de esta aleación se muestran en la Figura 4.21.

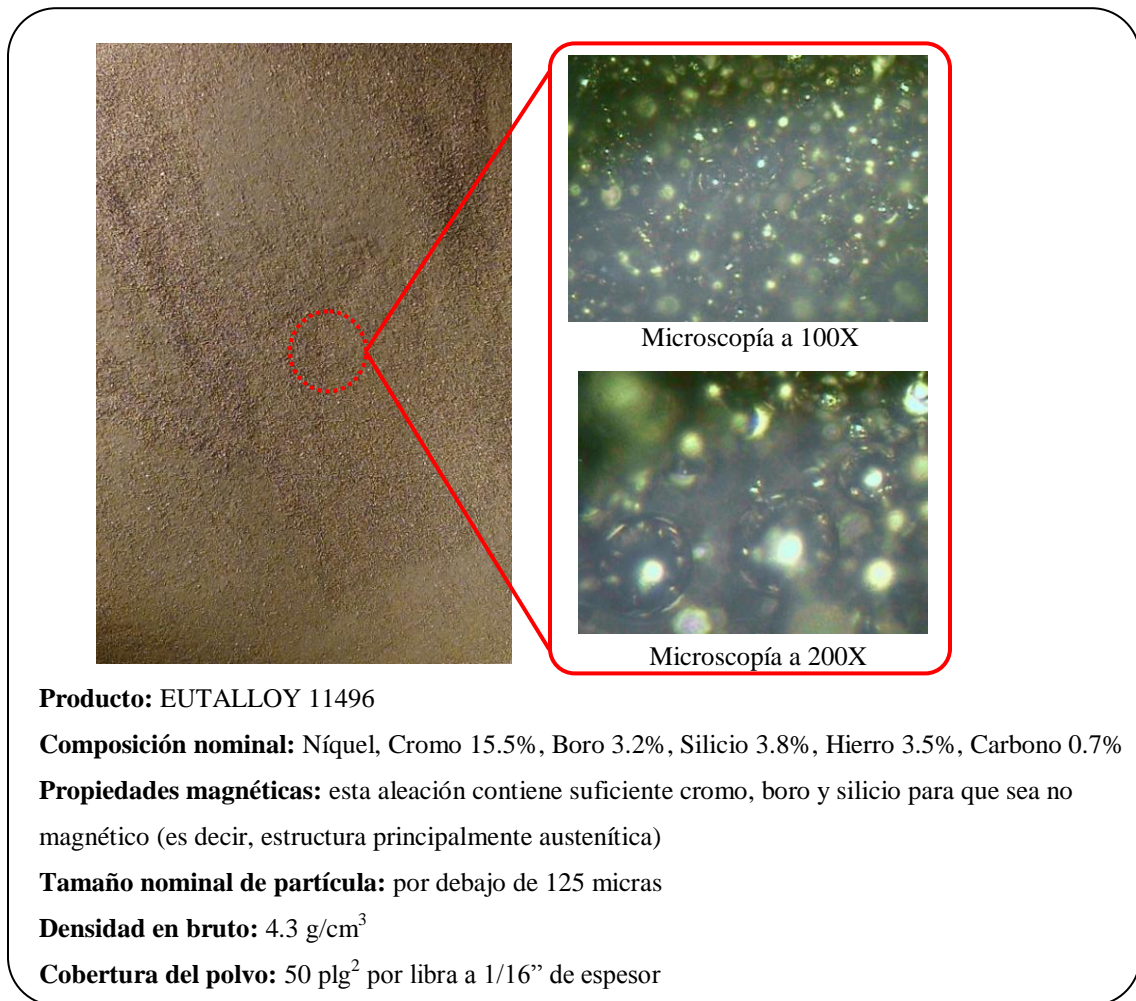


Figura 4. 21. Propiedades físico-químicas de la aleación micropulverizada EUTALLOY 11496 (ANEXO B3)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El control de la temperatura de precalentamiento de las superficies de las probetas se da gracias al uso de un termómetro láser FLUKE 62MAX+ como se muestra en la Figura 4.22.



Figura 4. 22. Control de temperatura de precalentamiento en la superficie de las probetas mediante el uso de un termómetro láser FLUKE 62MAX+

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En primera instancia la temperatura de precalentamiento controlada fue hasta 200°C, pero esta temperatura no fue la suficiente para que el material metálico pulverizado se adhiriera a la superficie de la probeta, esto ocasionó un anclaje nulo y el desprendimiento de éste. Figura 4.23.



Figura 4. 23. La temperatura de precalentamiento (200°C) en la probeta no fue suficiente para conseguir la adherencia del metal de aporte con la superficie

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En cambio, en otros escenarios se consiguió adherencia del metal pulverizado sobre la superficie de la probeta cuando la temperatura se estableció en 320°C y 420°C (Figura 4.24); esta adherencia se verificará con el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G-65.



Figura 4. 24. La adherencia del metal pulverizado en la superficie de la probeta por proyección térmica se dio a temperaturas de 320°C y 420°C

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Bajo estas dos condiciones de temperatura a 320°C y a 420°C se procedió a realizar el blindaje de todas las probetas (Figura 4.25), para posteriormente realizar el pesaje antes y después de los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada en la cámara de niebla salina.



Figura 4. 25. Blindaje de probetas por proyección térmica de aleación metálica micro pulverizada EUTALLOY 11496

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.2.6.- MEDICIÓN DE DUREZA BRINELL FINAL

Estos valores de dureza corresponden a los tomados después del proceso de blindaje por proyección térmica y se muestran en la Figura 4.26 y enlistados en la Tabla 4.3.



Figura 4. 26. Registro de dureza Brinell en probetas después del proceso de blindaje

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 3. Valores de dureza Brinell de las probetas destinadas al ensayo de desgaste por abrasión, después del proceso de blindaje.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

DUREZA FINAL BRINELL (HB)											
Probeta	MEDICIONES										\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
P1	213	207	215	226	220	216	211	216	215	222	216,10
P2	224	239	220	227	216	235	218	243	226	227	227,50
P3	235	211	233	237	227	222	229	222	229	241	228,60
P4	213	227	207	207	226	224	217	233	211	233	219,80
P5	222	199	215	215	211	233	218	222	213	216	216,40
P6	212	197	185	180	197	200	204	202	211	199	198,70
S1	220	226	233	237	222	227	243	220	229	224	228,10
S2	287	257	233	276	249	300	289	293	222	267	267,30
S3	245	224	233	226	249	226	220	229	249	353	245,40
S4	213	233	249	224	249	227	237	226	239	213	231,00
S5	226	206	209	227	220	207	207	211	213	241	216,70
S6	226	209	207	215	216	224	224	209	209	213	215,20
G1	239	274	253	295	229	206	282	259	289	226	255,20
G2	215	222	209	213	209	239	215	253	245	259	227,90
G3	222	239	211	215	253	267	213	222	241	222	230,50
G4	239	233	249	220	235	209	216	237	202	239	227,90
G5	271	284	274	305	251	300	307	298	291	289	287,00
G6	261	271	245	307	269	257	243	255	231	287	262,60

4.2.7.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE BLINDAJE

El proceso de blindaje por proyección térmica, por tratarse de una aplicación manual, es necesario realizar una medición del espesor depositado, para determinar su uniformidad a lo largo de la superficie de cada probeta; esta medición se realiza mediante el uso del equipo DEMAQ QS5 que es un medidor de espesor y corrosión por ultrasonido (Figura 4.27)

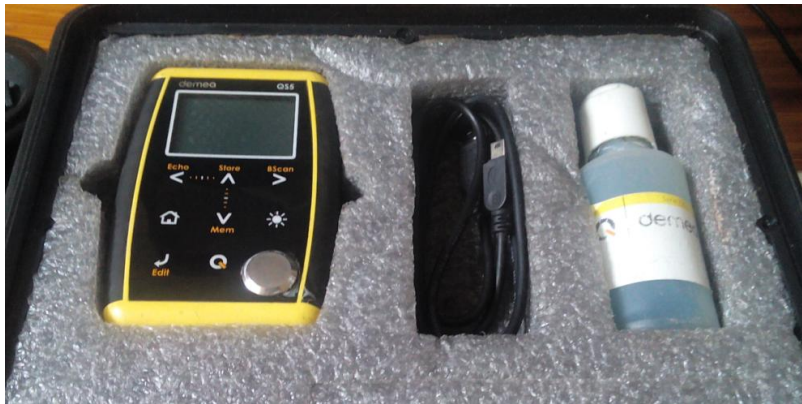


Figura 4. 27. Medidor de espesores por ultrasonido DEMAQ QS5

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Así mismo al igual que los equipos de medición antes descritos, el DEMAQ QS5 requiere de calibración, misma que se la hace, situando el transductor adherido con gel, sobre el patrón del equipo; la medida que debe entregar de acuerdo al catálogo del fabricante es 6.35mm. (Figura 4.28)

Una vez verificada la medida de calibración, el equipo está listo para su uso, el proceso lo muestra la Figura 4.29 y el registro de espesores entregados por el equipo se enlista en la Tabla 4.4.



El QS5 utiliza un nuevo sistema de calibración de cero (delay) que se activa con solo al apoyar el transductor sobre el disco de calibración.

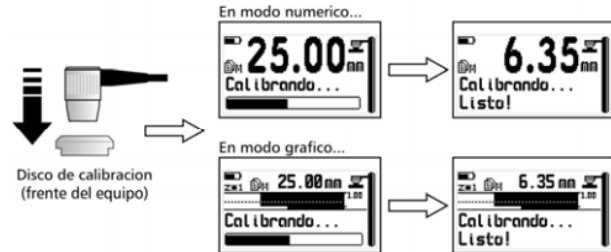


Figura 4. 28. Calibración del medidor de espesores por ultrasonido DEMAQ QS5

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 29. Medición de espesor de blindaje en probetas

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 4. Valores de espesor de blindaje en probetas para ensayo de desgaste por abrasión.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ESPEJOR INICIAL		ESPEJOR DE PROBETAS FINAL (mm)							X	ESPEJOR BLINDAJE
		MEDICIONES								
Probeta	mm	1	2	3	4	5	6			
P1	10,90	11,45	11,55	11,35	11,45	11,32	11,42	11,42	0,52	
P2	12,50	13,19	13,26	13,32	13,24	13,25	13,32	13,26	0,76	
P3	10,50	11,10	11,12	11,23	11,55	11,77	11,32	11,35	0,85	
P4	12,20	13,03	12,94	13,02	12,84	12,78	12,71	12,89	0,69	

Tabla 4.4. Continuación

P5	12,00	12,90	12,93	12,67	12,67	12,61	12,56	12,72	0,72
P6	10,20	11,28	11,32	11,02	10,77	10,60	10,34	10,89	0,69
S1	11,00	11,77	11,70	11,71	11,72	11,83	11,68	11,74	0,73
S2	11,50	12,01	11,95	12,00	12,05	12,48	12,38	12,15	0,65
S3	11,50	12,10	12,03	12,20	12,17	12,67	12,69	12,31	0,81
S4	11,60	12,18	12,11	12,26	12,17	12,45	12,12	12,22	0,62
S5	11,60	12,32	12,29	12,45	12,46	12,61	12,58	12,45	0,85
S6	11,50	12,33	12,32	12,09	12,13	12,11	12,24	12,20	0,70
G1	11,50	12,29	12,34	12,16	12,17	12,14	12,02	12,19	0,69
G2	10,80	11,43	11,51	11,43	11,47	11,52	11,66	11,50	0,70
G3	10,80	12,08	12,09	11,48	11,62	10,65	10,65	11,43	0,63
G4	12,00	12,74	12,69	12,70	12,71	12,88	12,97	12,78	0,78
G5	11,80	12,87	12,78	12,37	12,58	12,53	12,75	12,65	0,85
G6	12,50	13,18	13,32	12,94	12,92	13,05	12,90	13,05	0,55

4.2.8.- MEDICIÓN DE PESOS ANTES DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE ABRASIVO Y CORROSIVO

El pesaje de las probetas previo a los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada en cámara de niebla salina, se lo realizó en una balanza de precisión digital AE ADAM de capacidad máxima 250 gramos con precisión 0,001 como pide la norma ASTM G-65 (Figura 4.30) y el respectivo registro de pesos se muestran en la Tabla 4.5.



Figura 4. 30. Registro de pesos de probetas en balanza de precisión ADAM, antes de los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 5. Valores de peso en probetas antes de los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

PESO INICIAL			
Probeta	gramos	Probeta	gramos
P1	177,858	C1	44,519
P2	204,745	C2	55,358
P3	167,397	C3	50,263
P4	201,718	C4	51,247
P5	200,508	C5	55,718
P6	166,135	C6	65,042
S1	174,623	C7	55,564
S2	172,258	C8	42,537
S3	166,581	C9	49,727
S4	184,432	C10	61,682
S5	185,847	C11	66,446
S6	178,859	C12	42,131
G1	196,807	C13	55,408
G2	193,876	C14	65,264
G3	170,592	C15	53,953
G4	194,574	C16	51,107
G5	196,937	C17	50,856
G6	196,854	C18	55,293
E1	199,350	C19	59,903
E2	200,209	C20	50,217
EC1	49,957	C21	53,381
EC2	53,263	C22	44,339
EC3	58,847	C23	42,117
EC4	46,449	C24	51,909

4.2.9.- ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO SEGÚN ASTM G-65

Previo al ensayo es necesario controlar los diferentes parámetros de operación de la máquina de ensayos por desgaste abrasivo, que se encuentra en los Laboratorios de Fundición de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato; algunos parámetros de la máquina se encuentran ya establecidos, según la Tabla 4.6. También queda establecido el tipo de procedimiento a utilizar en el presente ensayo según la Tabla 2.3; este procedimiento es el B que es útil en materiales resistentes a abrasivos de medio y bajo grado.

Tabla 4. 6. Parámetros de control de la máquina para ensayos de desgaste por abrasión.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Parámetro	Estado	Observación	Referencia
Velocidad del motor (rpm)	Adecuado		Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Caja reductora	Adecuado	Relación 10:1	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Fuerza a la probeta (N)	Adecuado	130N para procedimiento B	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Diámetro de rueda (mm)	Adecuado	Ø228.6mm espesor 12.7mm	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Dureza de caucho (Shore A)	Adecuado	65.5 - material chlorobutyl e=20mm	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Tipo de abrasivo	Adecuado	Arena de sílice	
Tamaño de grano del abrasivo (%)	Por verificar	Ensayo de granulometría	ASTM G65 solicita Especificación ASTM E-11
Humedad del abrasivo (%)	Por verificar	Ensayo de humedad	
Flujo del abrasivo (g/min)	Por verificar	Flujo laminar y constante	
Contador de revoluciones	Adecuado	Sistema de control	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Tolva abastecedora de abrasivo	Adecuado		Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Boquilla alimentadora	Adecuado	Ubicación entre probeta y rueda	Tesis grado-Jacob Pérez Quiroga-FICM-UTA-2014
Tiempo de prueba (min)	Adecuado	Procedimiento B-2000 rpm = 11 min	ASTM G65

De acuerdo a la Tabla 4.6 se procede a verificar el intervalo de tamaño de grano del abrasivo a utilizar en el ensayo de desgaste por abrasión, en este caso, la arena de sílice; la norma ASTM G-65 pide utilizar la especificación ASTM E-11 ^[12], de esta manera el equipo que se utiliza es el W.S. TYLER RX-812 (Figura 4.31), que se encuentra provisto de cuatro clases de tamices: N°18 (1mm ó 0.0394 in), N°25 (710 µm ó 0.0278 in), N°35 (500 µm ó 0.0197 in) y N°60 (250 µm ó 0.0098 in). (Anexo E1)



Figura 4. 31. Equipo para granulometría WS TYLER RX-812 según ASTM E-11

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La arena de sílice tiene una forma de cuarzo redondeada, su morfología y composición química se muestra en la Figura 4.32.

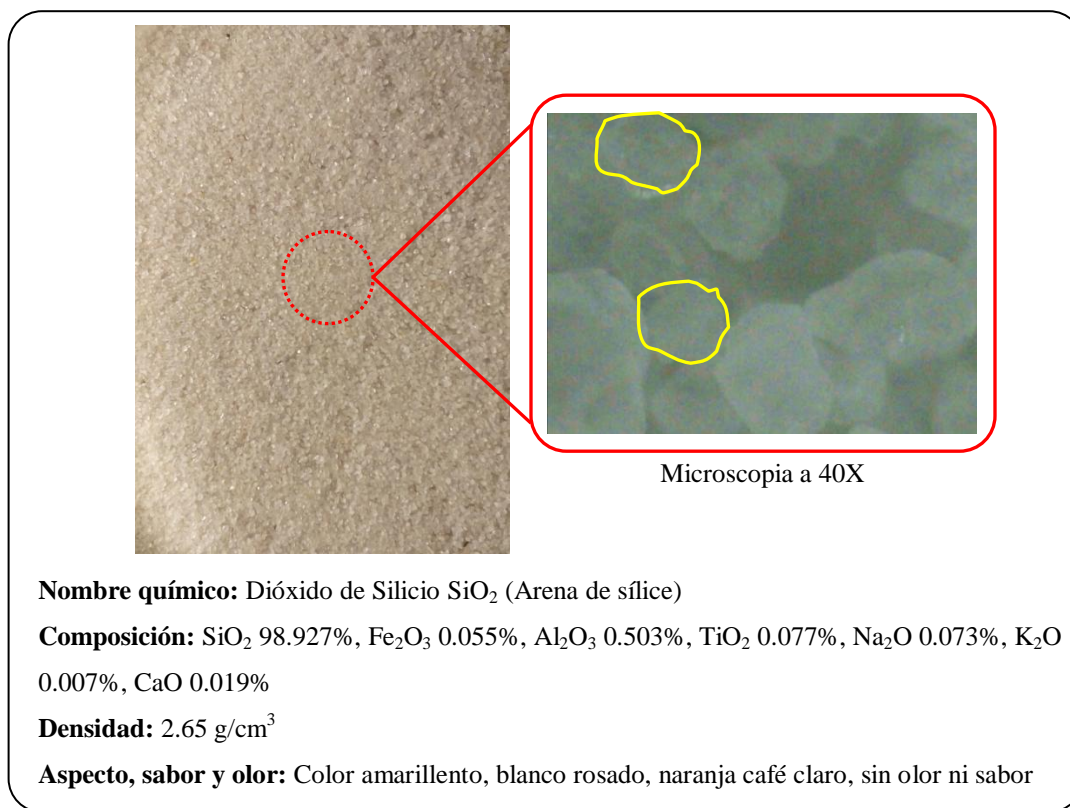


Figura 4. 32. Algunas propiedades físico-químicas de la arena de sílice (ANEXO B4)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Para obtener los intervalos de tamaño de partícula se necesita una muestra de 100 gramos de arena de sílice, primero se pesan los tamices completamente vacíos, se arma el equipo TYLER RX-812 y se somete la muestra de arena de sílice a vibración durante 20 minutos; transcurrido este tiempo se pesan nuevamente los tamices y también la base con el residuo de arena que contiene cada uno. La diferencia de pesos indicará el porcentaje de grano retenido según el tamiz que corresponde. Este proceso de granulometría se muestra en la Figura 4.33 y los resultados en la Tabla 4.7.



Figura 4. 33. Análisis de granulometría en equipo WS TYLER RX-812 según ASTM E11. a) Pesaje de 100 g de muestra, b) pesaje de tamices vacíos, c) vibración de muestra durante 20 min, d) pesaje de tamices con el producto retenido

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 7. Intervalos de tamaño de partículas de la muestra de arena de sílice.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Tamiz	Peso tamiz + Retenido	Peso tamiz vacío	% retenido
Malla N° 18	397,50	397,50	0,00
Malla N° 25	400,05	399,60	0,45
Malla N° 35	370,75	370,50	0,25
Malla N° 60	356,90	350,40	6,50
BASE	452,10	359,40	92,70
ERROR	0,10		0,10
TOTAL	1977,40	1877,40	100,00

La norma ASTM G-65 indica que los intervalos de tamaño de partículas de la arena que se utiliza en el ensayo de desgaste por abrasión (Anexo A1), que su mayor porcentaje de retención (95%) se encuentra en el tamiz N° 70 y abertura de 212 μm (0.0083 in) y en los demás tamices la retención es mínima. En el caso de la arena de sílice y de acuerdo a la Tabla 4.7, se nota que en la base el porcentaje de retención es del 92.70%, es decir, pasó el tamiz N° 60 que tiene una abertura de 250 μm (0.0098 in) (Anexo E1) y en tal caso el grano es fino en su mayor proporción y puede ser utilizado como abrasivo en el ensayo de desgaste.

Otro de los parámetros a controlar en la arena de sílice es la humedad, esto se lo hace con el equipo SHIMADZU MOC-120H (Figura 4.34), es un equipo que trabaja con un rango de muestra entre 12 – 13 gramos; inicialmente el equipo se calibra en cero, se coloca la muestra, se inicia el análisis y cuando llega hasta aproximadamente 120°C automáticamente entrega el valor de humedad. Este proceso se muestra en la Figura 4.35.



Figura 4. 34. Equipo de medición de balance de humedad SHIMADZU MOC-120H

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 35. Proceso de medición de humedad. a) Calibración en cero del equipo, b) pesaje de muestra, c) registro del valor de humedad

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los valores obtenidos del análisis de humedad de la arena de sílice se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4. 8. Valores de humedad de la arena de sílice.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Muestra	Peso (g)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
Muestra 1	12,246	120	0,06
Muestra 2	12,230	120	0,07
Muestra 3	12,068	94	0,07
Muestra 4	12,191	122	0,05
Muestra 5	12,300	118	0,07
Muestra 6	12,389	120	0,03
Muestra 7	12,271	120	0,06
Muestra 8	12,374	120	0,05
Muestra 9	12,388	119	0,06
Muestra 10	12,200	122	0,06
PROMEDIO	12,266		0,06

De acuerdo a la norma ASTM G-65 se establece que el contenido de humedad de la arena no debe exceder el 0.5% en peso, entonces, según la Tabla 4.8 el valor de humedad de la arena de sílice es apto para realizar el ensayo de desgaste por abrasión.

La última variable que se desconoce es directamente en la máquina de ensayo de desgaste por abrasión, y es el flujo de arena que se produce desde la tolva de abastecimiento, hasta la boquilla; este flujo de arena es importante, ya que debe ser constante y debe fluir en forma de cortina garantizando que pase entre la muestra y la rueda de caucho. El flujo de arena de acuerdo a la norma ASTM G-65, lo establece entre 300 a 400 g/min.

Los pasos a seguir para establecer el flujo de arena son:

- Verificar que la boquilla esté ubicada entre la probeta y la rueda de caucho
- Establecer un flujo constante de arena por medio de la apertura/cierre de la válvula manual ubicada bajo la tolva
- Verificar que el chorro de arena que proporciona la boquilla es en forma de cortina
- Recolectar muestras de arena durante un minuto y posterior pesaje de las mismas

El proceso de regulación del flujo de arena de sílice en la máquina de ensayos de desgaste por abrasión se muestra en la Figura 4.36, así como los resultados del muestreo en la Tabla 4.9.

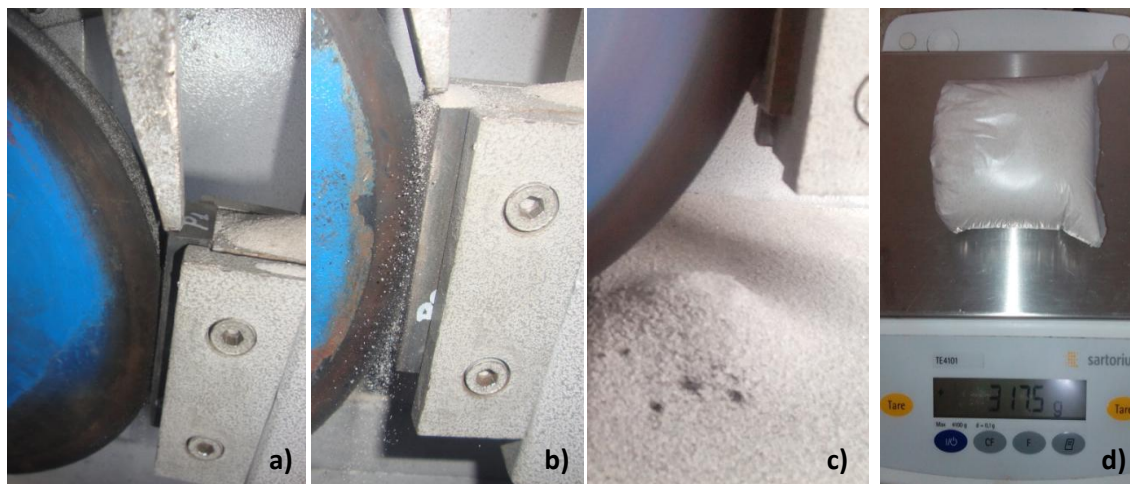


Figura 4. 36. Proceso de regulación del flujo de arena de sílice. a) Ubicación de la boquilla, b) Flujo en forma de cortina, c) Recolección de muestra de arena durante 1 min, d) Pesaje de muestra

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 9. Valores de flujo de la arena de sílice.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Muestra	Peso (g)	Flujo (g/min)
Muestra 1	317,50	317,50
Muestra 2	342,60	342,60
Muestra 3	338,10	338,10
Muestra 4	333,50	333,50
Muestra 5	331,50	331,50
Muestra 6	326,10	326,10
Muestra 7	321,30	321,30
Muestra 8	319,40	319,40
Muestra 9	316,70	316,70
Muestra 10	313,90	313,90
PROMEDIO	326,06	326,06

Según la Tabla 4.9, queda establecido el flujo de arena de sílice en 326.06 g/min, valor que está dentro del rango que solicita la norma ASTM G-65 que es entre 300 y 400 g/min.

Una vez revisados todos los parámetros, el proceso para realizar el ensayo de desgaste por abrasión es como sigue:

- Ubicar firmemente cada probeta en el portaprobetas
- Añadir los pesos adecuados al brazo de la palanca para desarrollar la fuerza necesaria que presiona la probeta contra la rueda; en este caso la fuerza es 130N
- Ajustar el contador de revoluciones al número que se necesita; de acuerdo al procedimiento B, el número de revoluciones es 2000 rpm (Figura 4.37)
- Habilitar el flujo de arena de sílice, mediante la graduación de la válvula manual en la ubicación que estableció un flujo constante de 326 g/min
- Iniciar la rotación de la rueda e inmediatamente bajar el brazo de palanca con cuidado, permitiendo así, que la probeta toque la rueda (Figura 4.37)
- Como el sistema de control es automático, el giro de la rueda se detendrá cuando se hayan alcanzado las 2000 rpm (en aproximadamente 11 minutos), en ese instante se debe levantar el brazo de palanca, detener el flujo de arena y extraer la probeta para su posterior pesaje.



Figura 4. 37. Ensayo de desgaste por abrasión según el procedimiento B de la ASTM G-65

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Las probetas ensayadas a desgaste por abrasión con y sin blindaje, y de acuerdo al tipo de preparación superficial sea: pulido mecánico con disco abrasivo, sandblasting con abrasivo mineral de roca volcánica, granallado con abrasivo metálico, se muestran en la Figura 4.38.

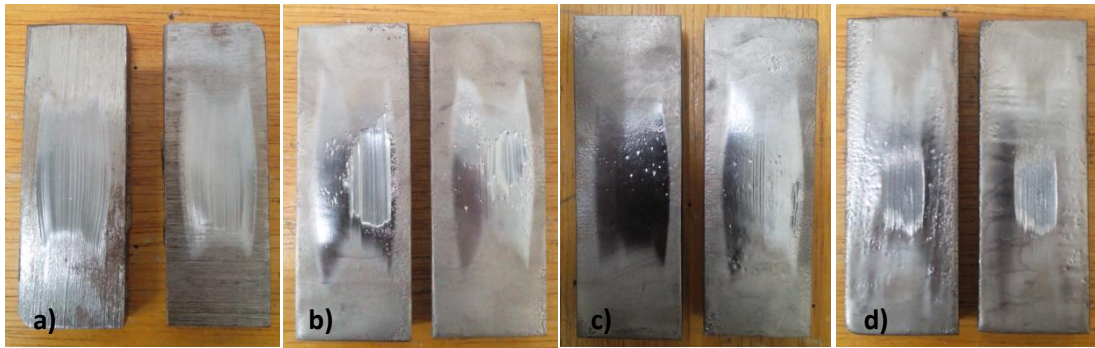


Figura 4. 38. Probetas ensayas a desgaste por abrasión. a) De acero AISI 1045 sin blindaje, b) De acero AISI 1045 con preparación superficial de pulido y con blindaje, c) De acero AISI 1045 con preparación superficial de sandblasting mineral y con blindaje, d) De acero AISI 1045 con preparación superficial de granallado metálico y con blindaje

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.2.10.- MEDICIÓN DE PESOS DESPUÉS DEL ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO

Una vez realizado el ensayo de desgaste por abrasión a todas las probetas se procede a su pesaje, con la misma precisión utilizada antes del ensayo que es 0.001 g, como se muestra en la Figura 4.39 y los valores de pesos en la Tabla 4.10.



Figura 4. 39. Pesaje de probetas después del ensayo de desgaste por abrasión, con precisión 0.001 g, en balanza de precisión ADAM

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 4. 10. Valores de peso de probetas después del ensayo de desgaste por abrasión.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

PESO FINAL	
Probeta	gramos
P1	177,351
P2	204,192
P3	166,822
P4	201,147
P5	199,928
P6	165,557
S1	174,538
S2	172,169
S3	166,483
S4	184,337
S5	185,753
S6	178,763
G1	196,602
G2	193,643
G3	170,374
G4	194,326
G5	196,709
G6	196,628
E1	198,525
E2	199,404

4.2.11.- CÁLCULOS DE PÉRDIDA DE VOLUMEN

Mediante el uso de los valores obtenidos de pesos iniciales y finales que muestran las Tablas 4.5 y 4.10, respectivamente, para las probetas que fueron sometidas al ensayo de desgaste por abrasión, se procede a calcular la pérdida de volumen en milímetros cúbicos según la ecuación Ec. 2.3, así mismo, se calculará la desviación estándar según la ecuación Ec. 2.4, el coeficiente de variación según la ecuación Ec. 2.5 y el coeficiente de desgaste mediante el uso de la ecuación Ec. 2.1. Todos los valores calculados se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4. 11. Resultados de los ensayos de desgaste abrasivo.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Probeta	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Peso perdido (gramos)	Desgaste abrasivo volumen (mm ³)	Media (mm ³)	Desviación estándar (σ)	Coefficiente de variación (%)	Dureza superficial (HB)	Coefficiente desgaste (K)
P1	177,858	177,351	0,507	64,59	71,42	3,57	5,00	216,10	0,258
P2	204,745	204,192	0,553	70,45				227,50	0,296
P3	167,397	166,822	0,575	73,25				228,60	0,309
P4	201,718	201,147	0,571	72,74				219,80	0,295
P5	200,508	199,928	0,580	73,89				216,40	0,295
P6	166,135	165,557	0,578	73,63				198,70	0,270
S1	174,623	174,538	0,085	10,83	11,83	0,62	5,25	228,10	0,046
S2	172,258	172,169	0,089	11,34				267,30	0,056
S3	166,581	166,483	0,098	12,48				245,40	0,057
S4	184,432	184,337	0,095	12,10				231,00	0,052
S5	185,847	185,753	0,094	11,97				216,70	0,048
S6	178,859	178,763	0,096	12,23				215,20	0,049
G1	196,807	196,602	0,205	26,11	28,83	1,84	6,38	255,20	0,123
G2	193,876	193,643	0,233	29,68				227,90	0,125
G3	170,592	170,374	0,218	27,77				230,50	0,118
G4	194,574	194,326	0,248	31,59				227,90	0,133
G5	196,937	196,709	0,228	29,04				287,00	0,154
G6	196,854	196,628	0,226	28,79				262,60	0,140
E1	199,350	198,525	0,825	105,10	103,82	1,80	1,74	146,40	0,284
E2	200,209	199,404	0,805	102,55				147,00	0,279

4.2.12.- IDENTIFICACIÓN METALGRÁFICA DEL ACERO AISI 1045

Para identificar la metalografía del acero AISI 1045 sin ningún tipo de recubrimiento, es necesaria la preparación de la probeta, esto se lo hace prensando la muestra de acero en bakelita hasta obtener un cuerpo sólido circular y manejable para el respectivo proceso de lijado; este lijado es secuencial de acuerdo al tipo de grano de la lija, sean estos: 240, 320, 400, 600 y 1500. Después del lijado se realiza un pulido en paño a 150 rpm, y con el uso de alúmina de 1 μm en suspensión en agua.

Seguidamente se realiza el ataque químico de la probeta, asegurándose primero que haya quedado perfectamente pulida; el reactivo químico que se utiliza para el ataque es Nital 2, con un tiempo de 5 segundos, transcurrido ese tiempo se debe mojar con agua la superficie de la probeta para detener el ataque químico. Después se procede a secar la probeta con flujo de aire y finalmente se realiza el análisis en el microscopio. El proceso de preparación de la probeta para el análisis metalográfico se muestra en la Figura 4.40.



Figura 4. 40. Análisis metalográfico del acero AISI 1045. a) Prensado de probeta en bakelita, b) Lijado manual en lijas 240, 320, 400, 600 y 1500, c) Pulido mecánico en paño a 150 rpm, d) Ataque químico con Nital 2, e) Enjuague en agua de probeta, f) Secado de probeta, g) Análisis en microscopio

Fuente: Autor: Jorge Paredes

De igual manera en la Figura 4.41 se muestran las probetas a trabajar en bakelita, y los materiales y químicos que se utilizaron, sean estos, la alúmina de 1 μm para el pulido en paño a 150 rpm y para el ataque químico Nital 2.

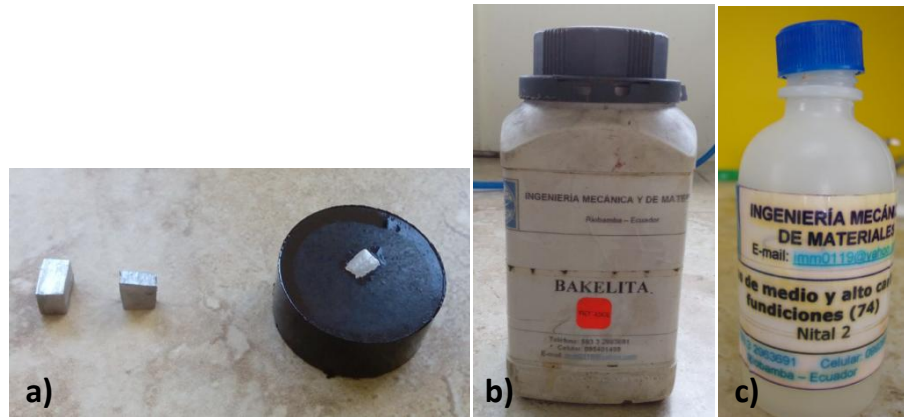


Figura 4. 41. Materiales para análisis metalográfico. a) Muestras de acero AISI 1045 prensado en bakelita, b) Bakelita en gránulos, c) Nital 2 para ataque químico

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.42 muestra la fotografía capturada por la cámara instalada en el microscopio a un aumento de 100X, y esta imagen será procesada mediante software para determinar los porcentajes de ferrita y perlita que contiene la muestra de acero AISI 1045 y posteriormente determinar la dureza del material y el porcentaje de carbono.

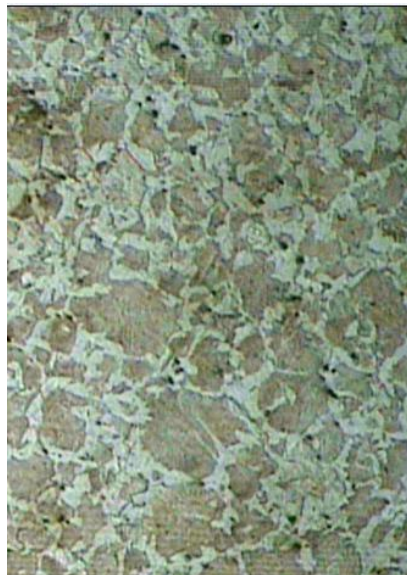


Figura 4. 42. Imagen tomada a 100X de la muestra de acero AISI 1045, con reactivo Nital 2 y tiempo de ataque 5 segundos

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El análisis metalográfico entregó los siguientes resultados obtenidos en el software, como muestra la Figura 4.43, y la respectiva ficha técnica del ensayo se detalla en el Anexo D2.

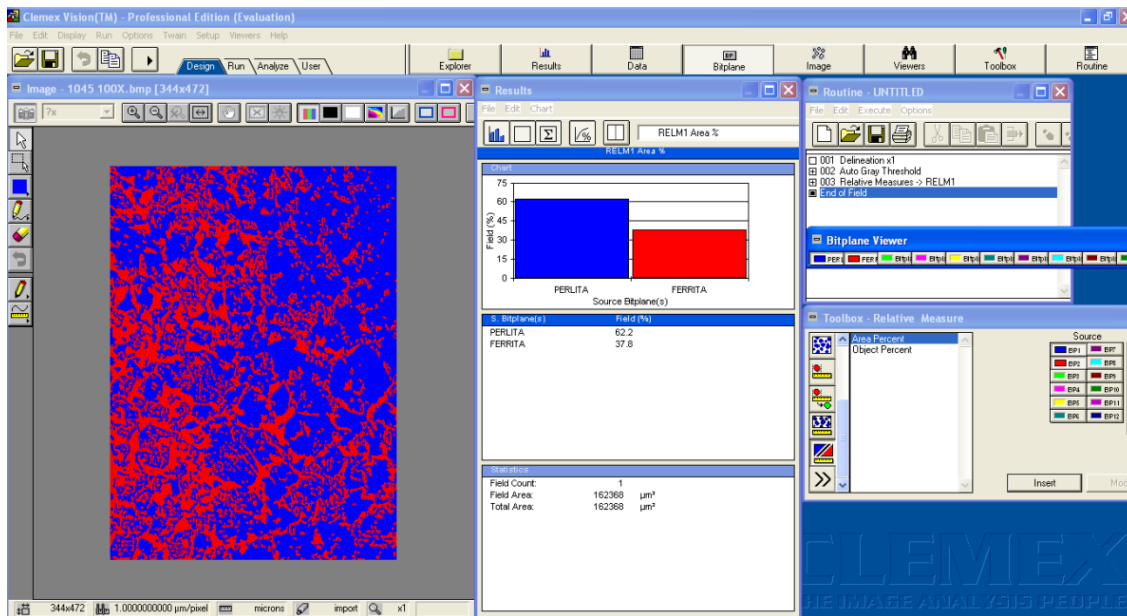


Figura 4. 43. Resultados del análisis metalográfico del acero AISI 1045, en él se indica 62.2% de perlita y 37.8% de ferrita

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.2.13.- ENSAYO DE CORROSIÓN EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA

De acuerdo a la norma ASTM B-117 y a los datos entregados por el Laboratorio de Metalografía de la EPN (Tabla 4.12), a continuación se detallan los parámetros que se utilizarán en el ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina para los eventos de 100 horas y 200 horas:

Tabla 4. 12. Parámetros técnicos de la cámara de niebla salina.

(Fuente: Laboratorio EPN)

Marca	ASCOTT	Material carcasa	No metálico, resistente a impactos y corrosión
Procedencia	Inglaterra	Fuente alimentación	110V, 1 fase
T cámara	Desde ambiente hasta 50°C o más	Normas ensayo	ASTM G85, ASTM B117
Humidificación	95 - 100%	Display	Digital
Salida niebla salina	0.5 - 5.0 ml por cada 80 cm2/hora o más	Controlador	Pantalla táctil
°T aire saturado	Desde ambiente hasta +63°C o más	Purgado gases	Automático
Volumen reservorio	80 litros o más	Registro	Temperatura y humedad gráfica
Capacidad nominal	450 litros o más	Puerto comunicación	RJ45 Ethernet incluido
Temporizadores	5 o más	Racks (estanterías)	Muestra 6 mínimo

La Figura 4.44 muestra la cámara de niebla salina para ensayos de corrosión acelerada, equipo que se encuentra en los laboratorios de metalografía de la Escuela Politécnica Nacional. En el Anexo C2, se muestra la certificación de la solución salina ASCOTT.



Figura 4. 44. Cámara de niebla salina de la EPN para ensayos de corrosión acelerada

Fuente: www.ascott-analytical.com

El procedimiento para el ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina para las probetas con blindaje y los sustratos es como sigue (Según Anexo C1):

- Se realiza la limpieza cuidadosa de cada probeta, mediante el uso de agua corriente y jabón, seguidamente se secan antes del ingreso a la cámara de niebla salina al 5%
- Se posicionan las superficies a ser evaluadas con una inclinación aproximada de 15° y 30° con respecto a la vertical, las probetas se acomodan dentro de la cámara con soportes de madera con el objetivo de exponer la mayor área posible a la niebla salina. Dentro de la cámara las probetas están divididas de acuerdo al tiempo de exposición como son 100 y 200 horas. (Figura 4.45)



Figura 4. 45. Ubicación de las probetas dentro de la cámara de niebla salina y configuración del panel

Fuente: Autor: Jorge Paredes

- Una vez transcurrido el tiempo de exposición de las probetas, de 100 y 200 horas, se procede a retirarlas de la cámara y se alistan para su respectiva limpieza. La Figura 4.46, muestra cada grupo de probetas después del ensayo de corrosión y de acuerdo al tiempo de exposición.

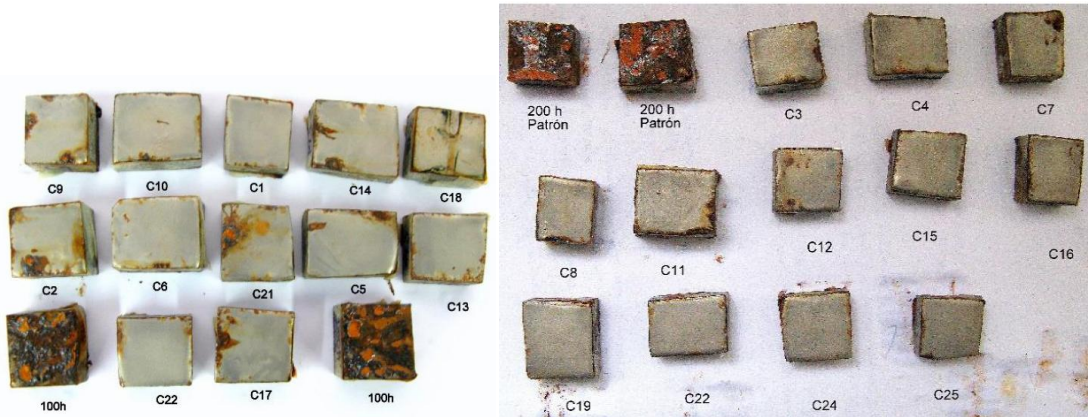


Figura 4. 46. Probetas extraídas de la cámara de niebla salina sin limpieza

Fuente: Autor: Jorge Paredes

- Finalmente se realiza la limpieza de todas las probetas, con agua corriente y jabón, con la finalidad de remover la suciedad y los depósitos salinos. (Figura 4.47)

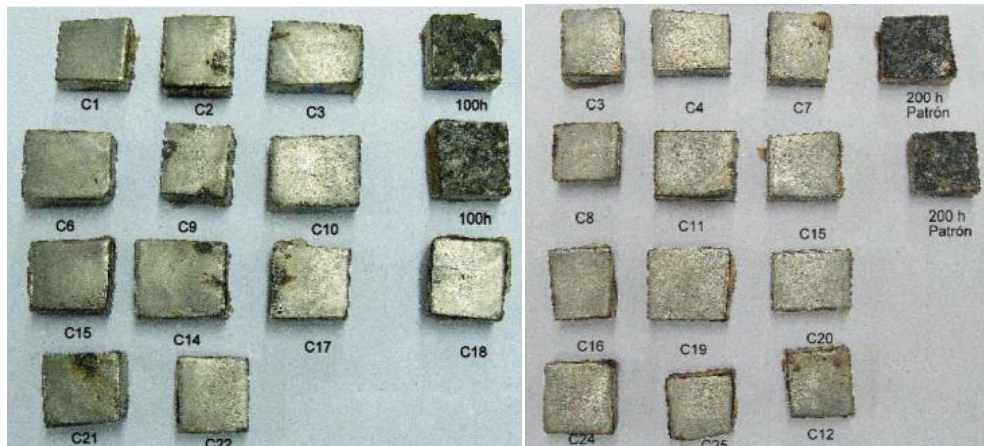


Figura 4. 47. Probetas después de la limpieza para eliminar residuos salinos y suciedad

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los ensayos de corrosión acelerada se realizaron en dos etapas, en primera instancia ingresan dentro de la cámara los dos juegos de probetas, para 100 y 200 horas, la máquina se programa para 200 horas; pero al haberse cumplido las primeras 100 horas se procede a extraer el primer grupo de probetas, mientras que el segundo grupo permanecerá hasta cumplirse las 200 horas de permanencia.

Los aspectos a analizar después de los ensayos de corrosión se detallan a continuación:

- Apariencia e identificación del tipo de corrosión
- Cuantificado y distribución de los defectos corrosivos, tales como: picaduras, manchas, rajaduras, etc.
- Apariencia después de la limpieza de productos corrosivos
- Determinación de la tasa o velocidad de corrosión de acuerdo a la Ecuación 2.9

La Figura 4.48, muestra las probetas después del ensayo de corrosión acelerada a 100 y 200 horas, dentro de las cuales se incluyen, las probetas que llevan el blindaje de acuerdo a la preparación superficial, y los sustratos que son los patrones de comparación.

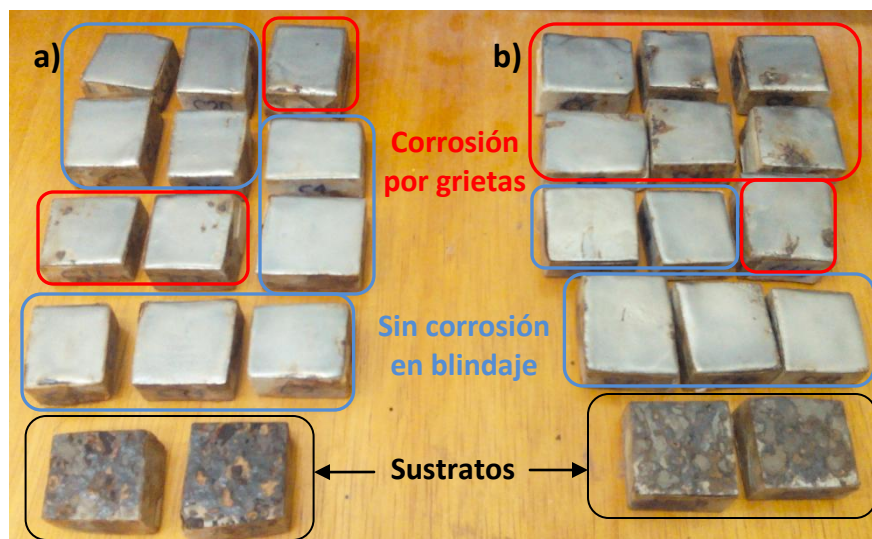


Figura 4. 48. Grupos de probetas después de los ensayos de corrosión acelerada, a) permanencia 200 horas,
b) permanencia 100 horas

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Por inspección visual y con la ayuda de una lámpara magnificadora modelo RT-202 (Figura 4.49), se procede a determinar el tipo de corrosión presente en cada probeta, sean estas, del tipo uniforme para los sustratos y por grietas para algunas probetas con blindaje; de acuerdo a esto se obtiene la Tabla 4.13.

Tabla 4. 13. Tipos de corrosión presentes en las probetas después del ensayo en la cámara de niebla salina.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Duración	Probeta	Tipo	Tamaño (mm)	Causa
100 horas	C1	No presenta corrosión		
	C2	Corrosión por grietas	9x6	Defectos en el blindaje
	C21	Corrosión por grietas	7x7	Defectos en el blindaje
	C5	Corrosión por grietas	6x2 - 4x3	Defectos en el blindaje
	C17	Corrosión por grietas	8x8 - 3x2 - 2x2	Defectos en el blindaje
	C6	No presenta corrosión		
	C13	No presenta corrosión		
	C10	No presenta corrosión		
	C14	Corrosión por grietas	6x4 - 7x3	Defectos en el blindaje
	C22	No presenta corrosión		
	C18	No presenta corrosión		
	C9	Corrosión por grietas	7x5 - 5x3 - 2x2	Defectos en el blindaje
	EC1	Corrosión uniforme		
	EC3	Corrosión uniforme		
200 horas	C7	Corrosión por grietas	2x2 - 1x1 - 1x1	Defectos en el blindaje
	C12	Corrosión por grietas	2x2 - 2x2	Defectos en el blindaje
	C3	No presenta corrosión		
	C19	No presenta corrosión		
	C16	No presenta corrosión		
	C20	No presenta corrosión		
	C24	No presenta corrosión		
	C15	No presenta corrosión		
	C23	No presenta corrosión		
	C8	Corrosión por grietas	7x2	Defectos en el blindaje
	C4	No presenta corrosión		
	C11	Corrosión por grietas	3x3	Defectos en el blindaje
	EC4	Corrosión uniforme		
	EC2	Corrosión uniforme		

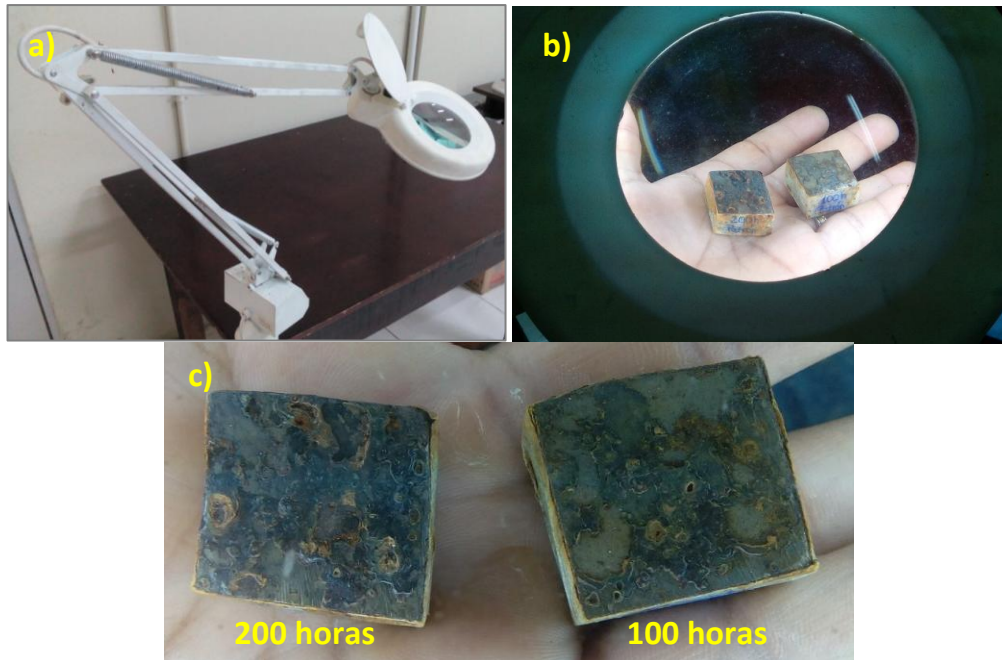


Figura 4. 49. Inspección visual del tipo de corrosión, a) lámpara magnificadora RT-202, b) Inspección de sustratos, c) corrosión uniforme presente en sustratos

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Para el caso de las probetas que presentan corrosión uniforme (sustratos) se procedió a remover por completo los productos corrosivos, y para las probetas con blindaje que presentan corrosión por grietas, se midió su tamaño; finalmente todas las probetas fueron pesadas en la misma balanza de precisión con la cual se tomó el peso inicial (Figura 4.50)

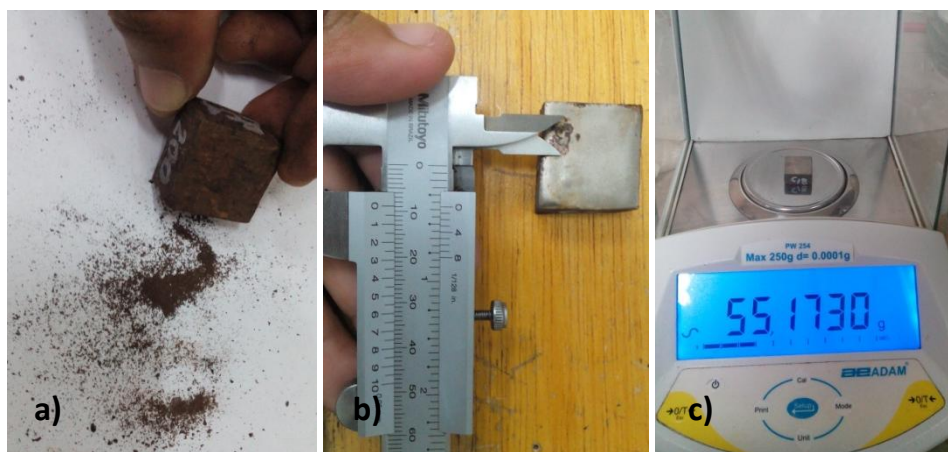


Figura 4. 50. a) Limpieza de corrosión uniforme en sustrato a 200h, b) Medición del tamaño de grietas en probeta con blindaje, c) Pesaje de probetas con precisión 4 dígitos

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Con los datos de pesos iniciales registrados en la Tabla 4.5, se procede al cálculo de la pérdida de masa, el área de exposición de las probetas y la velocidad de corrosión; la metodología de cálculo y los valores del coeficiente K pueden realizarse como indica la norma ASTM G-1 ^[13] (Anexo A4). La Tabla 4.14 muestra las tasas de corrosión calculadas.

Tabla 4. 14. Tasas o velocidades de corrosión calculadas.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Probeta	Pesos			Área (cm ²)	Densidad (g/cm ³)	Tiempo (h)	K	mm/yr
	Inicial (g)	Final (g)	Pérdida masa (g)					
C1	44,519	44,457	0,062	4,83	7,60	100	87600	1,4796
C2	55,358	55,297	0,061	5,52	7,60	100	87600	1,2737
C3	50,263	50,181	0,082	4,80	7,60	200	87600	0,9845
C4	51,247	51,208	0,039	5,40	7,60	200	87600	0,4162
C5	55,718	55,651	0,067	6,30	7,60	100	87600	1,2258
C6	65,042	64,993	0,049	6,16	7,60	100	87600	0,9169
C7	55,564	55,524	0,040	5,04	7,60	200	87600	0,4574
C8	42,537	42,461	0,076	4,60	7,60	200	87600	0,9522
C9	49,727	49,654	0,073	4,83	7,60	100	87600	1,7421
C10	61,682	61,602	0,080	6,67	7,60	100	87600	1,3825
C11	66,446	66,394	0,052	6,16	7,60	200	87600	0,4865
C12	42,131	42,119	0,012	5,06	7,60	200	87600	0,1367
C13	55,408	55,382	0,026	5,50	7,60	100	87600	0,5449
C14	65,264	65,153	0,111	6,96	7,60	100	87600	1,8382
C15	53,953	53,947	0,006	5,50	7,60	200	87600	0,0629
C16	51,107	51,065	0,042	4,80	7,60	200	87600	0,5043
C17	50,856	50,836	0,020	5,28	7,60	100	87600	0,4366
C18	55,293	55,173	0,120	5,52	7,60	100	87600	2,5057
C19	59,903	59,895	0,008	7,00	7,60	200	87600	0,0659
C20	50,217	50,178	0,039	5,40	7,60	200	87600	0,4162
C21	53,381	53,360	0,021	5,28	7,60	100	87600	0,4584
C22	44,339	44,23	0,109	5,06	7,60	100	87600	2,4784
C23	42,117	42,098	0,019	4,62	7,60	200	87600	0,2370
C24	51,909	51,909	0,000	5,76	7,60	200	87600	0,0000
EC1	49,957	49,846	0,111	5,06	7,85	100	87600	2,4480
EC2	53,263	52,986	0,277	5,52	7,85	200	87600	2,7999
EC3	58,847	58,731	0,116	5,52	7,85	100	87600	2,3451
EC4	46,449	46,191	0,258	5,06	7,85	200	87600	2,8449

4.3.- INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.3.1.- ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD

Los tres tipos de preparación superficial que fueron considerados para determinar la resistencia al desgaste por medio del ensayo abrasivo, han determinado que se tiene una mayor rugosidad en la superficie preparada con el proceso de sandblasting (Figura 4.51), dando un valor de 121.2 μm , en cambio, el proceso que entregó una menor rugosidad es el de preparación de superficie por medio del pulido mecánico, con un valor promedio de 34.93 μm ; con un valor intermedio de rugosidad de 43.26 μm se encuentra el proceso de granallado.

En términos de adherencia y anclaje, que relaciona, a la superficie de la probeta de acero, con el material metálico proyectado térmicamente, se puede afirmar que los mejores resultados se obtuvieron con las probetas que fueron preparadas superficialmente por medio de sandblasting; esto se debe, al tamaño de las partículas que componen el abrasivo mineral, que en este caso es de procedencia volcánica (granulo basáltico) y con tamaño de partículas en el orden de 1.5mm.

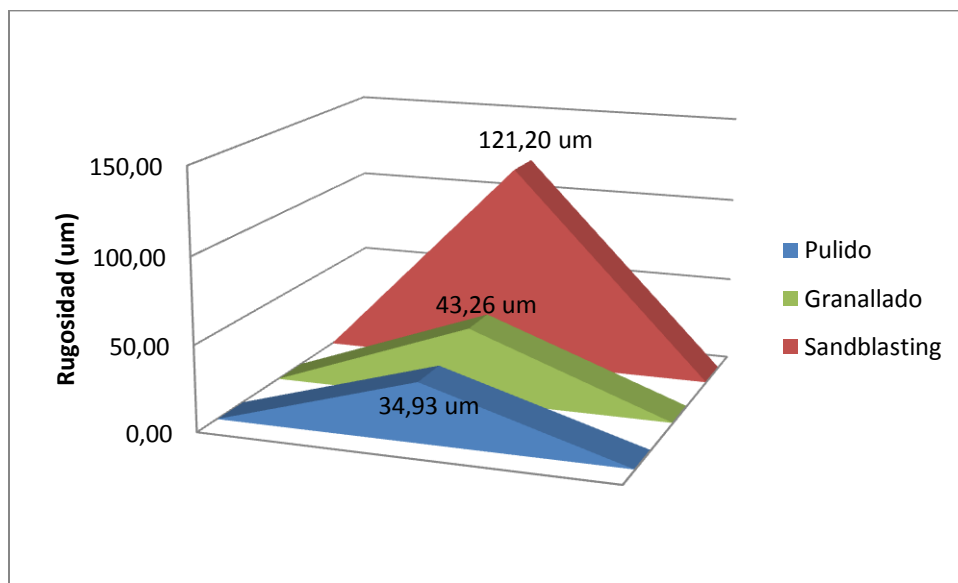


Figura 4. 51.Representación de la rugosidad en probetas según el acabado superficial

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.52, muestra el perfil de anclaje de la superficie preparada por sandblasting obtenida por microscopía, y en ella se observan, los picos altos y bajos, que permiten que el metal de blindaje llene esos espacios y se adhiera de mejor manera.



Figura 4. 52. Perfil de acabado superficial por sandblasting (Microscopía a 100X)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.53, muestra también la superficie preparada por sandblasting, pero tomada por microscopía electrónica de barrido (SEM), en la cual se identifica una superficie con huellas pronunciadas como resultado del chorro a presión con abrasivo mineral con partículas de 1.5mm de tamaño.

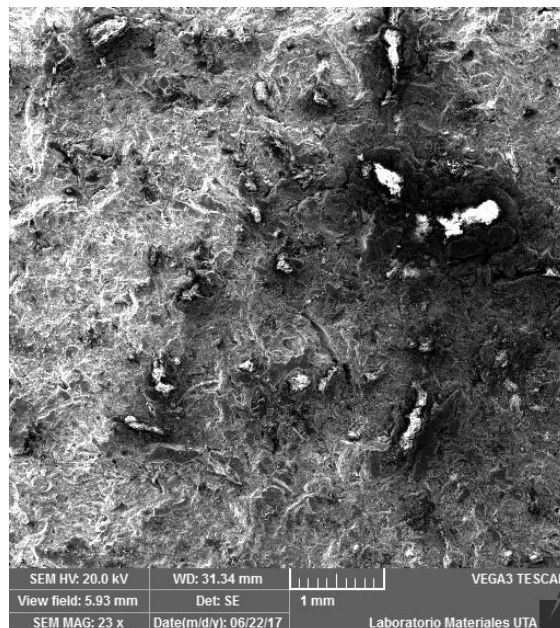


Figura 4. 53. Vista frontal de la superficie de la probeta preparada por sandblasting, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Diferentes de las partículas de granulo basáltico, están las de granalla metálica utilizadas en el granallado o también conocido como gritblasting, que en cambio estas miden en el orden de 0.3 a 0.42mm, y aunque sí son capaces de formar una superficie de anclaje adecuada para el blindaje, no lo hace en el grado del proceso de sandblasting. El perfil de anclaje se observa en la Figura 4.54.



Figura 4. 54. Perfil de acabado superficial por granallado metálico (Microscopia a 100X)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

También por microscopía electrónica de barrido, la Figura 4.55 muestra la vista frontal de la superficie preparada por granallado, en donde se puede observar una superficie más uniforme y con indentaciones con menor profundidad en comparación a las que se generan por sandblasting; esto debido a que las partículas de granalla son más finas.

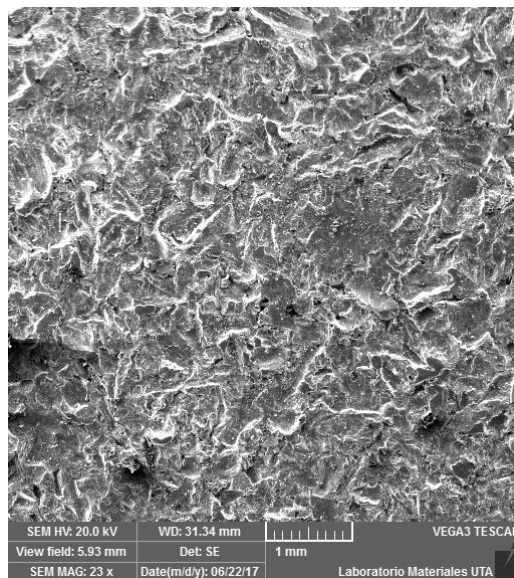


Figura 4. 55. Vista frontal de la superficie preparada por granallado metálico, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En un nivel bajo de anclaje queda la superficie preparada por pulido mecánico, que prácticamente deja una superficie lisa (Figura 4.56).

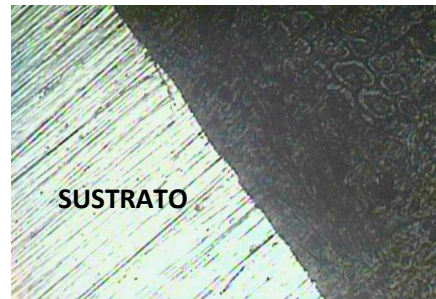


Figura 4. 56. Perfil de acabado superficial por pulido mecánico (Microscopia a 100X)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.57, muestra la cara frontal de la superficie preparada por pulido mecánico, en donde se puede observar zonas completamente lisas algunas rayaduras en distintas direcciones que son generadas por el disco abrasivo.

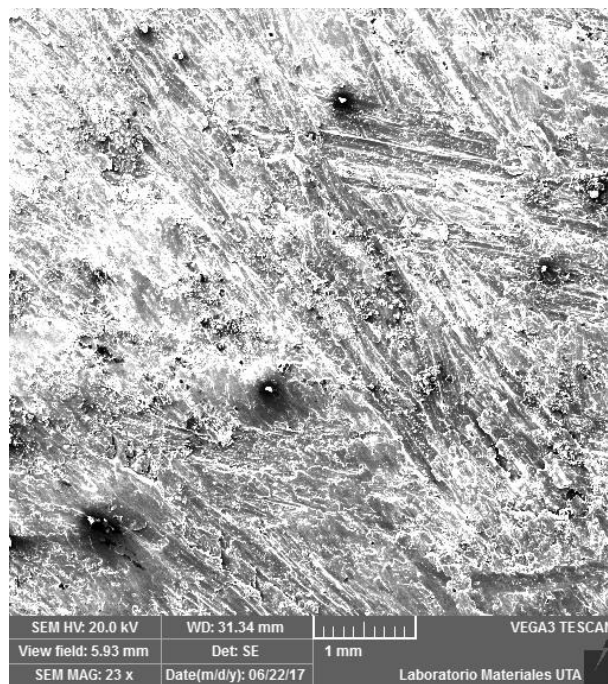


Figura 4. 57. Vista frontal de la superficie preparada por pulido mecánico, tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.3.2.- ANÁLISIS DE LA DUREZA

En la Figura 4.58 se puede observar que a nivel general se tiene un incremento de dureza en el blindaje comparado con la dureza del sustrato, y que este incremento de dureza es independiente del tipo de acabado superficial que se le dio a las probetas. El incremento de dureza está en el orden del 34 a 94%, y dentro de este rango se interpreta que la variación se da, debido al espesor de película aportado en la proyección térmica, que al tratarse de un proceso manual, existen factores que inciden.

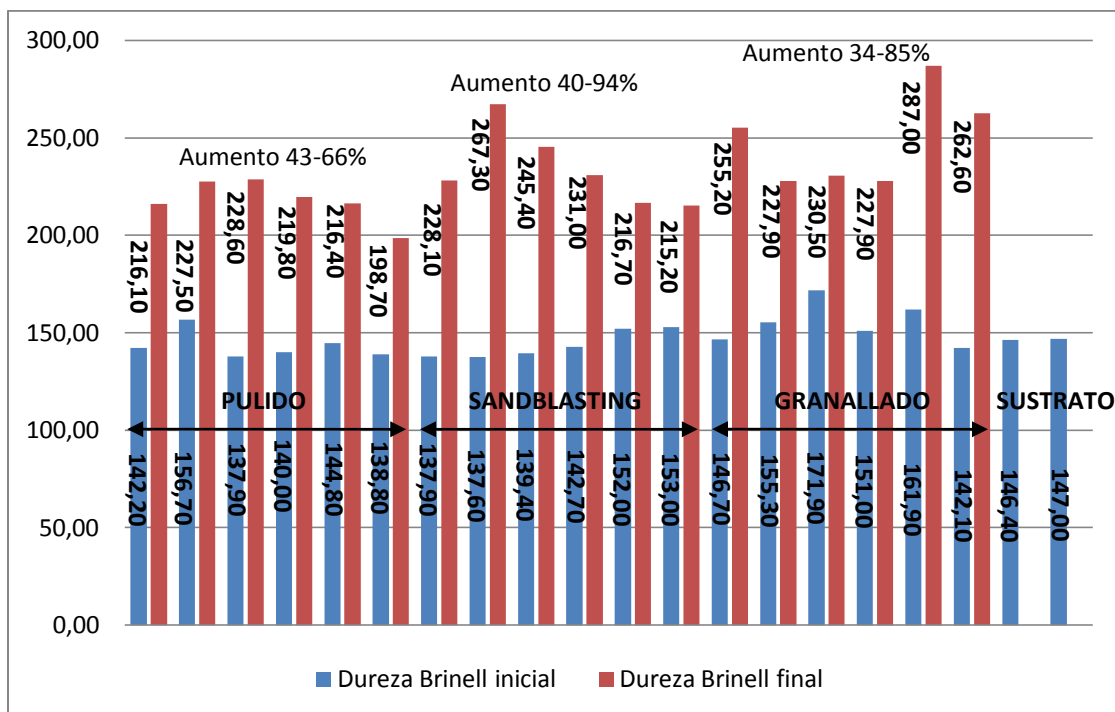


Figura 4. 58. Representación de la dureza antes y después del blindaje

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los factores que inciden en el espesor del blindaje y por ende en la dureza son: la velocidad de avance al depositar el material de aporte, la distancia entre la boquilla y la muestra, la cantidad de material aportado. El incremento de dureza en el blindaje se verá reflejado en la resistencia al desgaste que presenten las probetas en el ensayo de desgaste por abrasión.

4.3.3.- ANÁLISIS DEL ESPESOR DE BLINDAJE

Como se mencionó en el apartado anterior, el espesor de blindaje, es producto de un proceso aplicado manualmente y que depende de factores como son la velocidad de avance para el aporte del material, la distancia entre la boquilla y la superficie, la cantidad de material aportado, y también, de la graduación correcta de las presiones de los gases como son el acetileno y el oxígeno, ya que de ellos depende que el material de aporte consiga llegar a un estado líquido en el cual fluya sobre la superficie de la probeta y se distribuya en una forma uniforme posible, evitando formar acumulaciones de material por exceso y vacíos por carencia.

La Figura 4.59, muestra los valores de espesor de blindaje obtenidos que están en el orden de 0.5 a 0.9mm.

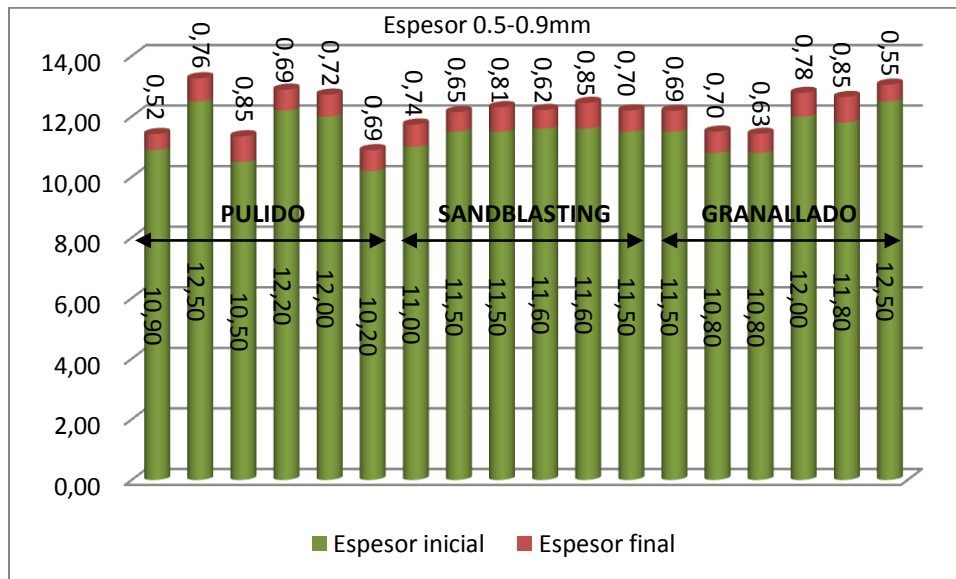


Figura 4. 59. Representación del espesor de blindaje con EUTALLOY 11496 por proyección térmica

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.60, muestra los límites o la zona de frontera entre el sustrato y el material de aporte que forma el blindaje; en este caso el blindaje está sobre una superficie preparada con granallado metálico.

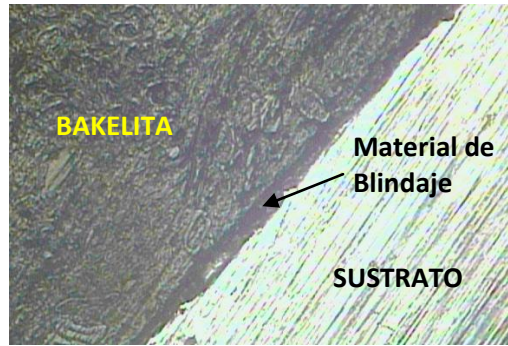


Figura 4. 60. Zona de frontera entre sustrato y material de blindaje (Microscopia a 100X)

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.3.4.- ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO

De acuerdo a la Tabla 4.11, y mediante la Ecuación 2.3, se consiguió calcular los valores de pérdida de volumen para cada probeta, sean estas, con blindaje en superficie preparada con pulido mecánico, con blindaje en superficie preparada por sandblasting, con blindaje en superficie preparada con granalla metálica y en muestras sin blindaje que corresponden al sustrato.

Y es precisamente la norma ASTM G-65, quien pide presentar los resultados de la prueba de abrasión como pérdida de volumen en unidades de milímetros cúbicos, dejando a un lado los resultados de pérdida de masa que bien pueden utilizarse internamente en laboratorios para comparar materiales de densidades equivalentes.

Según los resultados obtenidos de pérdida de volumen, se puede apreciar que el mayor desgaste abrasivo se consiguió en el sustrato, es decir, en el material de acero AISI 1045 sin haberle realizado el proceso de blindaje con EUTALLOY 11496 por proyección térmica; el valor promedio obtenido es 103.82 mm^3 de volumen perdido. El material que presentó un mejor comportamiento frente al desgaste abrasivo, fue, el que recibió blindaje sobre una superficie preparada con sandblasting de abrasivo mineral, con un valor promedio de 11.83 mm^3 de volumen perdido. Estos resultados se muestran en la Figura 4.61.

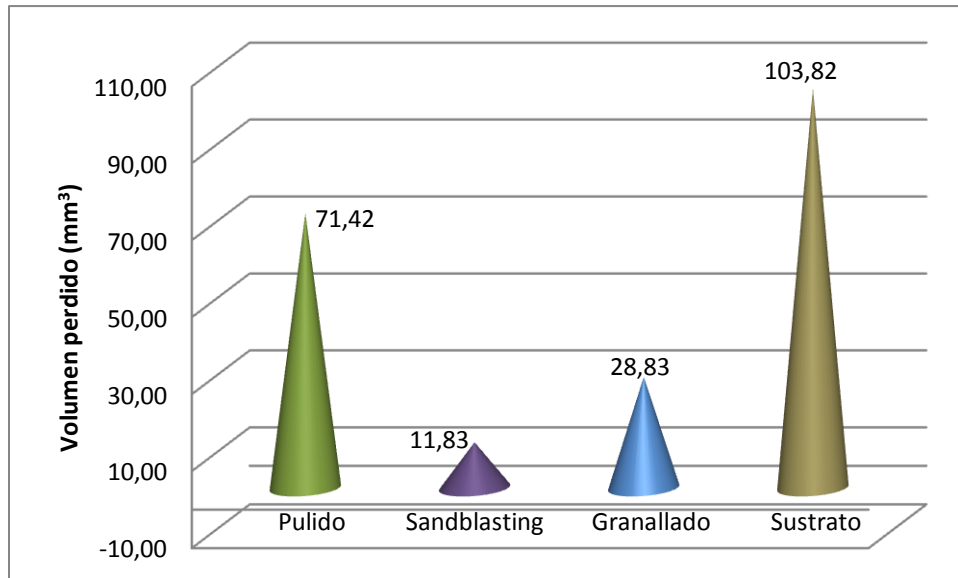


Figura 4. 61. Representación de la pérdida de volumen en el ensayo de desgaste abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Como se manifestó en el análisis de la rugosidad según la preparación de la superficie, se atribuye la menor pérdida de volumen a las probetas con blindaje en superficie preparada con sandblasting, debido al adecuado perfil de anclaje que presenta y como consecuencia de una mejor adherencia del metal aportado térmicamente en esa superficie.

Para garantizar la precisión y tendencia de los resultados obtenidos, la norma ASTM G-65, determina controlar los valores del coeficiente de variación ó la desviación estándar, ó ambos, por razones que estos valores, prácticamente, califican el funcionamiento de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo y determina si la máquina está controlada o fuera de control; en este último caso los resultados se tornan erráticos.

La norma incluso establece un valor máximo de control del 6% para el coeficiente de variación, que indica que la máquina tiene un alto grado de repetitividad y por consiguiente el ensayo se encuentra bajo control. El valor del 6% resulta de experimentaciones en tres tipos de materiales de referencia, tales como aceros para herramientas que son resistentes a la abrasión.

La Figura 4.62, muestra los valores del coeficiente de variación que califica el estado de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo, y demuestra que todos los ensayos se encuentran bajo control, con valores obtenidos en su mayoría por debajo del 6%.

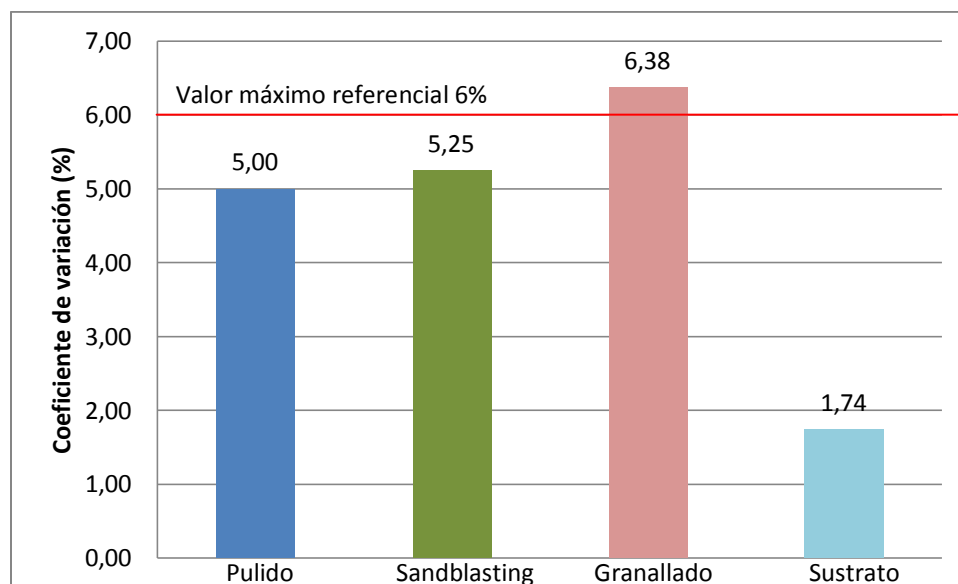


Figura 4. 62. Representación del coeficiente de variación para el ensayo de desgaste abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La Figura 4.63, muestra los valores correspondientes al coeficiente de desgaste (K) para cada escenario, sustrato sin blindaje, con blindaje en superficie preparada con pulido mecánico, con blindaje en superficie preparada con sandblasting y con blindaje en superficie preparada con granallado metálico; de tal forma, que se observa que los coeficientes de desgaste promedio para el sustrato oscilan en $0.281 \text{ mm}^3/\text{Nm}$, casi similar al coeficiente de desgaste del blindaje en superficie con pulido mecánico que tiene un valor promedio de $0.287 \text{ mm}^3/\text{Nm}$; siendo estos valores, las tasas más altas del ensayo.

De forma diferente, se observa un valor promedio de coeficiente de desgaste para el blindaje en superficie preparada con sandblasting de $0.051 \text{ mm}^3/\text{Nm}$, siendo esta la tasa más baja de desgaste por abrasión de todos los ensayos.

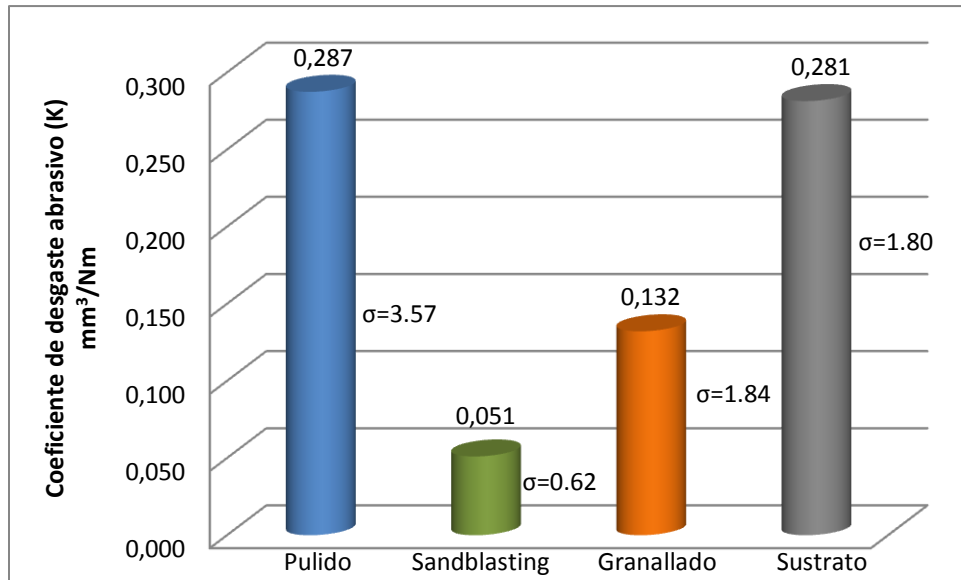


Figura 4. 63. Representación del coeficiente de desgaste abrasivo

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los resultados anteriores, vuelven a confirmar que la aplicación de blindaje por proyección térmica sobre una superficie casi lisa, que fue preparada por pulido mecánico, resulta altas tasas de desgaste, debido a un anclaje no adecuado del metal de aporte sobre la superficie.

La Figura 4.63, muestra también los valores de la desviación estándar, donde indican, que los valores no se encuentran tan dispersos de la media y están dentro de lo establecido en la norma ASTM G-65, según las Tablas X1.1 y X1.2 del Anexo A1.

En términos de dureza, se puede decir que es una propiedad de gran importancia en la resistencia al desgaste del material, es por eso que la dureza va relacionada con la pérdida de volumen; y queda definido que la dureza es inversamente proporcional a la pérdida de volumen.

La Figura 4.64, muestra la pérdida de volumen en contra de la dureza del material, en donde se puede observar, que a medida que incrementa la dureza la pérdida de volumen será menor, es decir el material es más resistente al desgaste.

De tal forma en la Figura 4.64, se puede afirmar que en el punto (A) se encuentra el material con mayor dureza y menor pérdida de volumen, sea el caso del material con blindaje en superficie preparada con sandblasting; en cambio, en el punto (B) se encuentra el material con menor dureza y mayor pérdida de volumen, siendo el caso del sustrato.

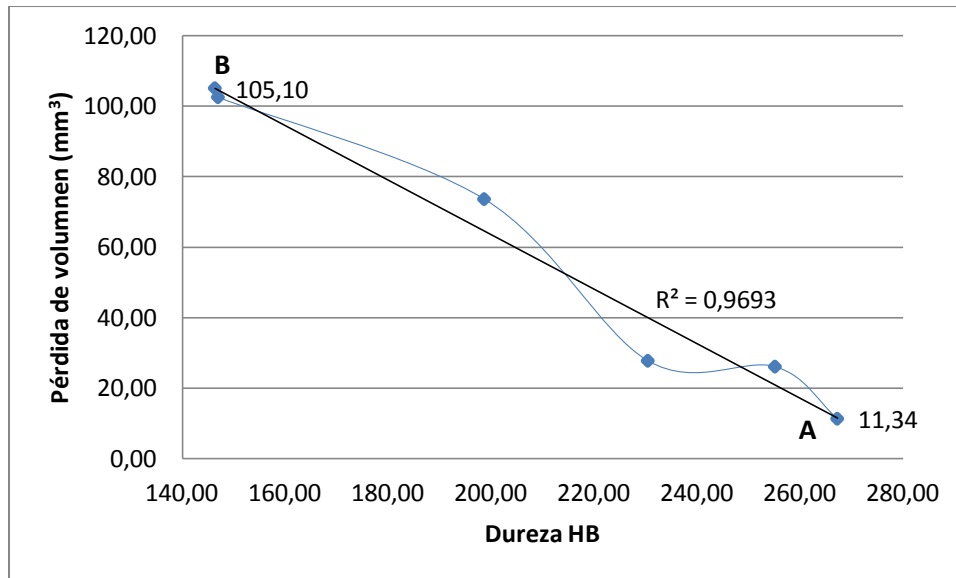


Figura 4. 64. Representación de la pérdida de volumen contra la dureza del material

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Para hablar en términos de resistencia al desgaste, es necesario el uso de la Ecuación 2.2, misma que define la resistencia al desgaste como el inverso de la pérdida de volumen; de esta manera, a partir de los datos de la Figura 4.64 se obtiene la Figura 4.65, que indica que a medida que la dureza incrementa también lo hace la resistencia al desgaste.

De esta manera, en la Figura 4.65, en el punto (C) se encuentra un material con determinada dureza y determinada resistencia al desgaste, siendo el caso del sustrato; y en el punto (D), se encuentra el material con mayor dureza y por ende mayor resistencia al desgaste abrasivo, siendo el caso del material que fue blindado sobre una superficie preparada por sandblasting.

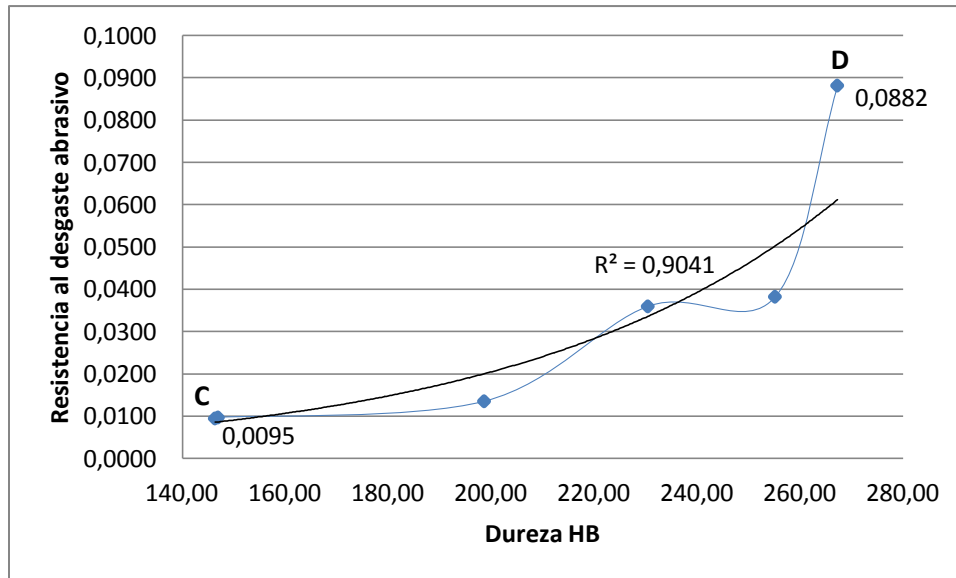


Figura 4. 65. Representación del incremento de dureza y resistencia al desgaste del material

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.3.5.- ANÁLISIS DE LA METALOGRAFÍA DEL SUSTRATO Y DEL BLINDAJE

4.3.5.1.- SUSTRATO

A partir del análisis realizado mediante software y con los datos de porcentajes de perlita y ferrita, se procede a calcular el porcentaje del carbono, la dureza, resistencia última a la tracción y el tamaño de grano del acero AISI 1045, utilizado como sustrato en el blindaje con aleación micropulverizada EUTALLOY 11496 por proyección térmica.

La Figura 4.66, muestra los porcentajes de perlita y ferrita presentes en el acero AISI 1045, utilizado como sustrato en el ensayo de desgaste por abrasión y según el análisis en el software; estos valores son 62.2% de perlita y 37.8% de ferrita.

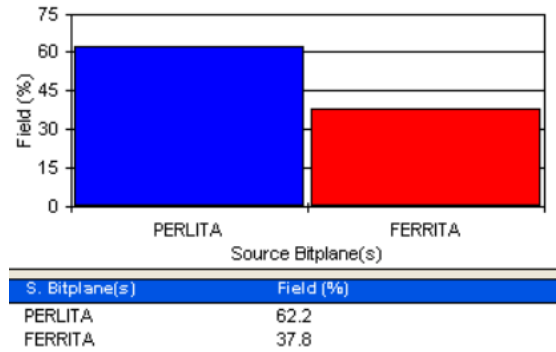


Figura 4. 66. Porcentajes de perlita y ferrita presentes en el acero AISI 1045 según el software

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Porcentaje de carbono: según el diagrama Fe-C, es la pendiente de la recta desde el (0.0) hasta el punto eutectoide, en donde se tiene 0.77% de carbono y 100% de perlita (86.5% ferrita + 13.5% cementita).

Donde:

$$\%C = \frac{\%P}{130} \quad Ec\ 4.1$$

$\%C$: porcentaje de carbono

$\%P$: porcentaje de perlita

$$\%C = \frac{62.2}{130} = 0,47$$

Dureza del acero: de acuerdo a W. Callister y al Metals Handbook Volume 4, se tiene:

Donde:

$$HB = \%P(HB_{perlita}) + \%F(HB_{ferrita}) \quad Ec\ 4.2$$

$\%F$: porcentaje de ferrita

$\%P$: porcentaje de perlita

$HB_{perlita}$: dureza brinell perlita

$HB_{ferrita}$: dureza brinell ferrita

$$HB = 62,2(240) + 37,8(90) = 183,3$$

Resistencia última a la tracción: según W. Callister – Materials Science and Engineering, se tiene que:

Donde:

$$\sigma_u = 500 HB \text{ (PSI)} \quad Ec\ 4.3$$

σ_u : resistencia última tracción

HB : dureza brinell del acero

$$\sigma_u = 500 * 183,3 = 91650 \text{ PSI}$$

Tamaño de grano: según la ASTM E-112 ^[14] y por análisis estadístico se tiene que:

Donde:

\bar{X} : Media aritmética de cantidad de granos

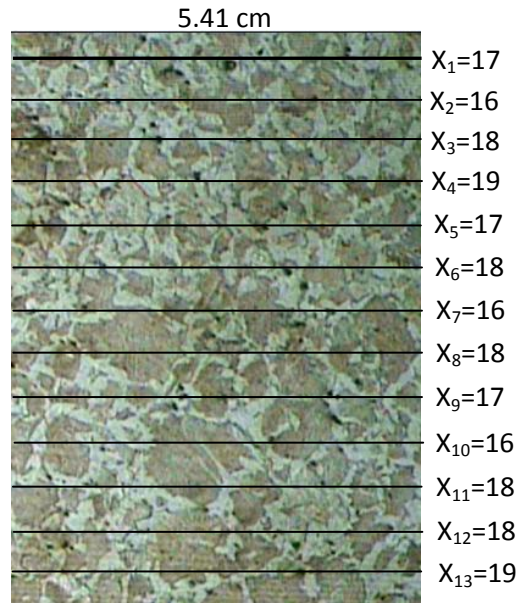
ΣX_i , sumatoria de la cantidad de granos que interceptan cada línea

n: cantidad de mediciones

\bar{d} : tamaño promedio de grano en micras

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad Ec\ 4.4$$

$$\bar{d} = \frac{\text{Longitud de línea referencial } (\mu m)}{\bar{x}} \quad Ec\ 4.5$$



$$\bar{x} = \frac{17 + 16 + 18 + 19 + 17 + 18 + 16 + 18 + 17 + 16 + 18 + 18 + 19}{13} = 17,46$$

Para la longitud de la línea referencial (5.41 cm), se tiene las siguientes conversiones:

1 cm = 37,795276 pixel

Para 100X, 1 pixel = 3,5 μm

$$\bar{d} = \frac{5,41cm * \frac{37,795276\ pixel}{1\ cm} * \frac{3,5\ \mu m}{1\ pixel}}{17,46}$$

$$\bar{d} = \frac{715,65\ \mu m}{17,46} = 40,99\ \mu m \approx 41\ \mu m$$

El Anexo A3, en la Tabla 4 de la ASTM E-112 para $\bar{d} = 41\ \mu m$, el índice de grano ASTM está entre 6.0 y 6.5

Realizando el cálculo del tamaño de grano por otra modalidad de la ASTM E-112 se tiene:

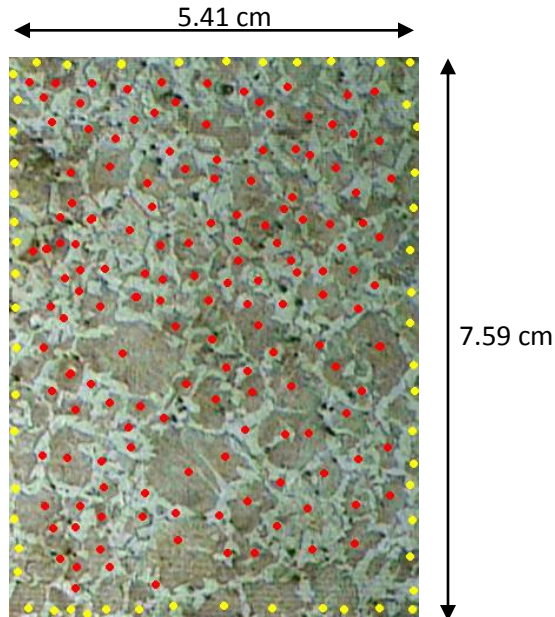
Donde:

$$N = 2^{G-1} \quad \text{Ec 4.6}$$

N: número de granos por plg^2 a 100X

G: índice de tamaño de grano ASTM

Granos completos = 151
Granos medios = $54/2 = 27$



Para determinar el número de granos por plg^2 , en la fotomicrografía se cuentan los granos completos (puntos rojos) y los granos medios (puntos amarillos), se suman y se divide para el área completa de la fotomicrografía, de la siguiente manera:

$$\text{Área de fotomicrografía} = \frac{(5,41 * 7,59)\text{cm}^2 * \text{plg}^2}{(2,54\text{cm})^2} = 6,36 \text{ plg}^2$$

$$N = \frac{(151 + 27) \text{ granos}}{6,36 \text{ plg}^2} = 27,98 \text{ granos/plg}^2$$

Reemplazando en la Ecuación 4.6 y despejando G se tiene:

$$G = \frac{\log (27,98)}{\log (2)} + 1 = 5,8 \approx 6$$

De los resultados obtenidos, el porcentaje de carbono corresponde a 0.47%, comparando este valor con el Anexo B5, se tiene que para el catálogo de IVAN BOHMAN, el catálogo SUMITEC y el Metals Handbook de la ASM, el rango en porcentaje de carbono para el acero AISI 1045 está entre 0.43 – 0.50% C.

Para el caso de la dureza los cálculos entregaron un valor de dureza brinell de 183.3, y comparando este valor con el Anexo B5, se tiene que para el catálogo de IVAN BOHMAN la dureza del acero AISI 1045 está en un rango de 220 – 235 HB, para el catálogo SUMITEC el valor de la dureza es 163 HB y para el Metals Handbook de la ASM el valor de la dureza está comprendido entre 163 – 170 HB.

En términos de la resistencia a la tracción el valor calculado es 91650 PSI, comparando este valor con el Anexo B5, se tiene que para el catálogo de IVAN BOHMAN la resistencia a la tracción es 65 kg/mm² equivalente a 92258 PSI, para el catálogo SUMITEC es 81900 PSI y para el Metals Handbook la resistencia a la tracción está entre 82000 – 85000 PSI.

Finalmente el tamaño de grano se lo determinó por análisis estadístico de acuerdo a la norma ASTM E-112 del Anexo A3, y resultó un valor de índice de tamaño de grano de 6.

4.3.5.2.- MATERIAL DE BLINDAJE

La aleación metálica micropulverizada utilizada para el blindaje del acero AISI 1045, es el EUTALLOY 11496, mismo que fue aplicado por proyección térmica; y como se mencionó antes la proyección térmica es un proceso de aplicación manual, y por ende, su acabado superficial está propenso a tener defectos que a simple vista son difíciles de observar.

La Figura 4.67, muestra el material de aporte distribuido en la superficie de las probetas de acero AISI 1045, que en los tres casos de preparación superficial fue posible aplicarlo a un solo paso, siempre y cuando la temperatura de precalentamiento estuvo en un rango de 320 a 420 °C.

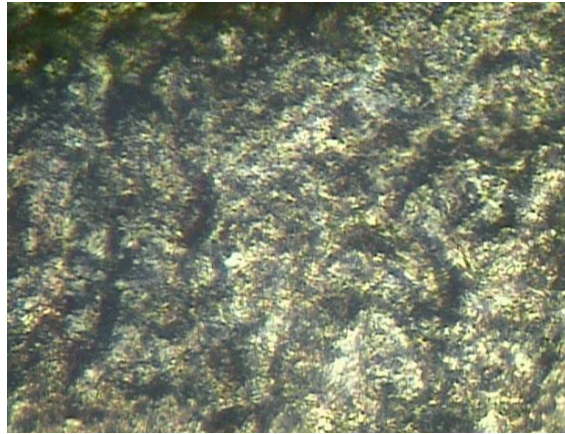


Figura 4. 67. Aleación metálica micropulverizada EUTALLOY 11496 distribuida en superficie de acero AISI 1045, microscopía a 200X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

También con la ayuda de microscopía electrónica de barrido (SEM), se puede observar en la Figura 4.68, que aparecen porosidades e inclusiones de óxidos, que son defectos característicos de las técnicas de deposición.

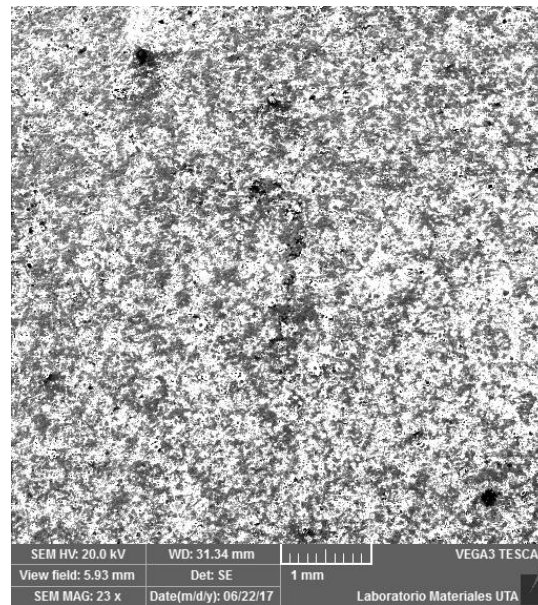


Figura 4. 68. Aparición de defectos en el blindaje, microscopía tomada con microscopio electrónico de barrido marca TESCAN VEGA3 a 23X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Preparando de mejor manera la muestra, para analizarla en el microscopio, se consiguió una mejor apreciación de los defectos presentes en el blindaje, como se muestran en la Figura 4.69, en donde se puede observar nidos de poros.

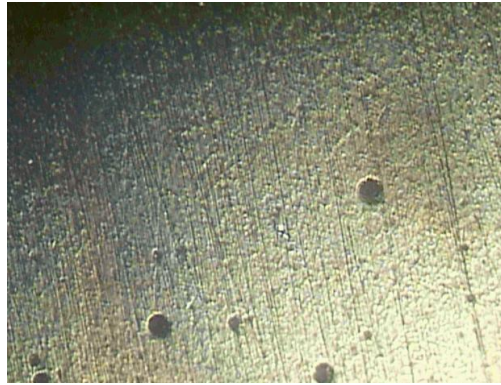


Figura 4. 69. Nidos de poros presentes en el blindaje, imagen a 100X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.3.6.- ANÁLISIS DE LA HUELLA DE DESGASTE

Para el caso del sustrato, en la Figura 4.70, se puede observar la micrografía de la huella de desgaste abrasivo, la cual se caracteriza por un mecanismo de desgaste de tipo microfatiga, debido a que la superficie ha sido arada en repetidas ocasiones por las partículas de la arena de sílice, produciendo desprendimiento de material.



Figura 4. 70. Huella de desgaste abrasivo en el sustrato, imagen microscópica a 100X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

La huella de desgaste abrasivo en la superficie preparada por pulido mecánico, se caracteriza por un mecanismo de desgaste abrasivo del tipo microcorte, por razones que las partículas abrasivas de la arena de sílice han penetrado la superficie y han liberado material de igual volumen que la ranura; este mecanismo pone en evidencia los defectos creados en la proyección térmica (Figura 4.71).

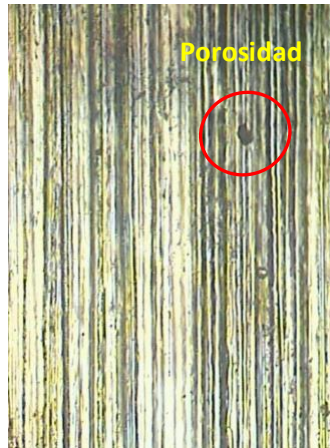


Figura 4. 71. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por pulido mecánico, imagen microscópica a 100X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Para la probeta con blindaje y preparación superficial por sandblasting, la huella de desgaste abrasivo se caracteriza por un mecanismo de desgaste abrasivo del tipo microarado; aquí la rugosidad de la superficie ha contribuido a un mejor anclaje del metal de aporte y por ende el desprendimiento de material ha sido en menor proporción, los surcos son menos profundos que en los casos anteriores (Figura 4.72).



Figura 4. 72. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por sandblasting, imagen microscópica a 100X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Finalmente la huella de desgaste abrasivo para la probeta con blindaje y preparación por granallado metálico, se caracteriza por tener una combinación de mecanismos de desgaste del tipo microfatiga y microcorte, existe desprendimiento de material debido a la penetración de las partículas y los surcos tienen una profundidad considerable (Figura 4.73).

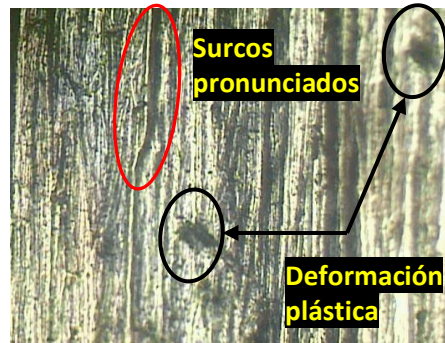


Figura 4. 73. Huella de desgaste abrasivo en la probeta con blindaje y preparación de superficie por granallado metálico, imagen microscópica a 100X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

4.3.7.- ANÁLISIS DE LA CORROSIÓN EN LOS ENSAYOS DE NIEBLA SALINA

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4.14, se presenta en la Figura 4.74 las velocidades de corrosión para las probetas que llevan blindaje de aleación metálica micropulverizada EUTALLOY 11496 y que fueron ensayadas a 100 horas dentro de la cámara de niebla salina; estos valores de velocidad de corrosión corresponden a corrosiones por grietas, y son producto de la acumulación de la solución salina dentro de las porosidades que generó el blindaje por proyección térmica, como se puede ver en la Figura 4.69.

De forma general se puede decir, que cualquier defecto superficial que se encuentre presente en el blindaje, será “foco” de acumulación de la solución salina ó sustancias ácidas de bajo pH, que darán inicio a la degradación del material presentando una apariencia con herrumbre u oxidación de coloración naranja-rojiza; de esta manera la corrosión seguirá avanzando por toda la superficie expuesta, en forma de una capa de óxido de hierro debido a la migración de los iones Fe^{2+} (átomos de hierro cargados positivamente).

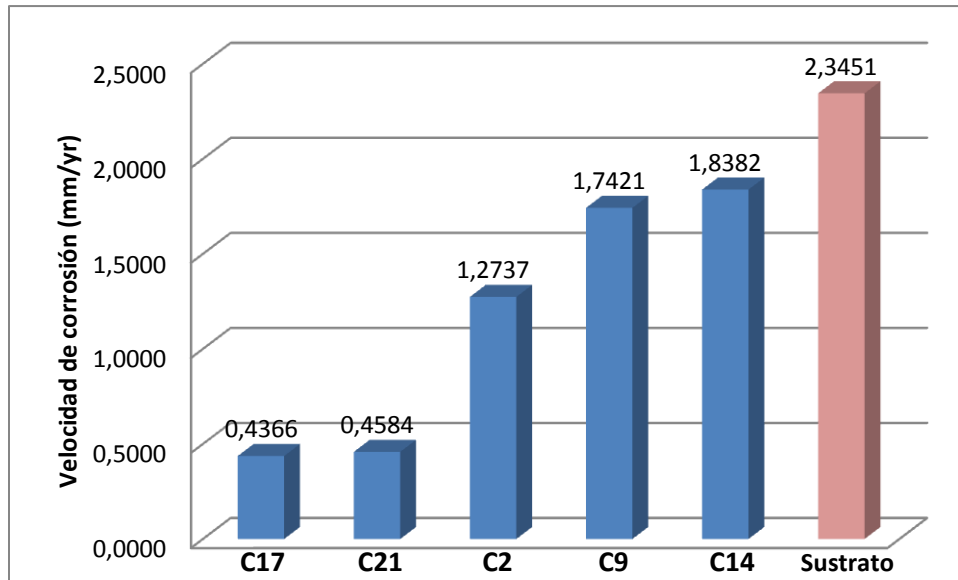


Figura 4. 74. Representación de la velocidad de corrosión en probetas expuestas a 100 horas en la cámara de niebla salina

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En la figura anterior, para las probetas con blindaje, se puede observar que la tasa de corrosión puede llegar hasta 1.8 mm/yr, y bastó con la presencia de un defecto superficial en el blindaje; en cambio para una corrosión uniforme como se presentó en el sustrato, la tasa de corrosión llega hasta 2.3 mm/yr. Ambos tipos de corrosión se muestran en la Figura 4.75.

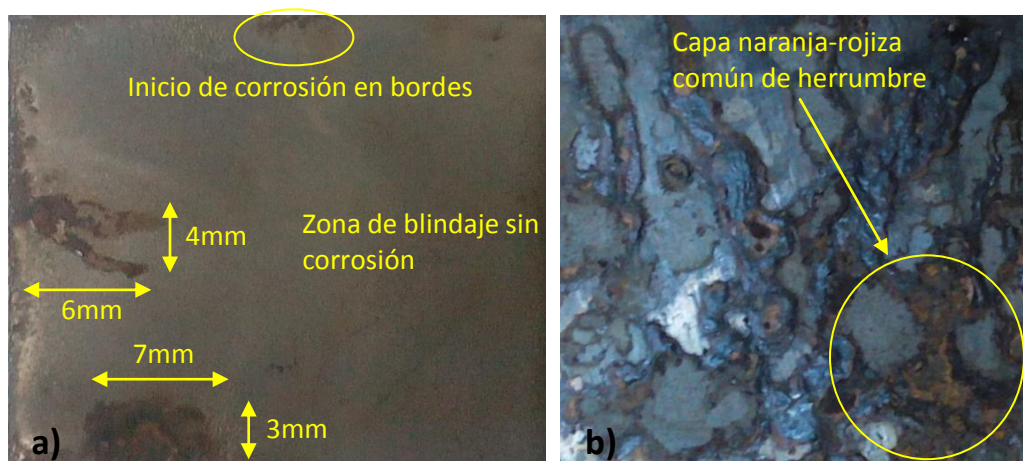


Figura 4. 75. Probetas expuestas a 100h de corrosión acelerada, a) Corrosión por grietas en probeta C14, b) Corrosión uniforme en sustrato

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En la Figura 4.76, se muestran las tasas de corrosión, en las probetas expuestas a 200h; se puede observar valores hasta 0.95 mm/yr para la probeta C8 que tiene blindaje, y se inicia la corrosión debido a la presencia de un defecto en el borde; y en el sustrato se tiene un valor de 2.79 mm/yr, la corrosión es tipo uniforme con una capa pronunciada de herrumbre (Figura 4.77)

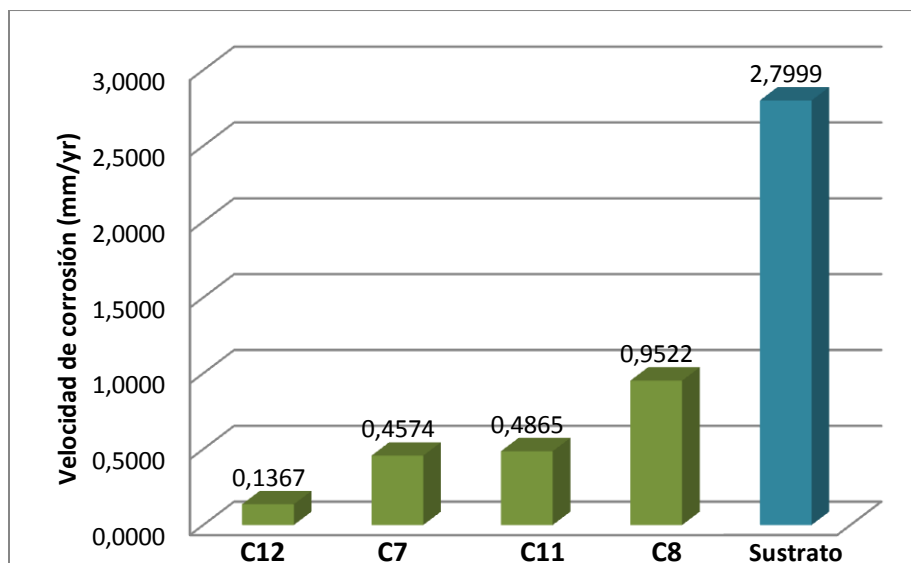


Figura 4. 76. Representación de la velocidad de corrosión en probetas expuestas a 200 horas en la cámara de niebla salina

Fuente: Autor: Jorge Paredes



Figura 4. 77. Probetas expuestas a 200h de corrosión acelerada, a) Corrosión por grietas en el borde de probeta C8, b) Corrosión uniforme en sustrato

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Es preciso mencionar que, el blindaje en las probetas, si protege la superficie ante el fenómeno de la corrosión acelerada con niebla salina, siempre y cuando no existan defectos superficiales, que se transforman en el “foco” de inicio de la corrosión. La Figura 4.78, muestra una probeta con blindaje que no sufrió ataque corrosivo y también se muestran de forma comparativa los sustratos expuestos a 100 y 200 horas.

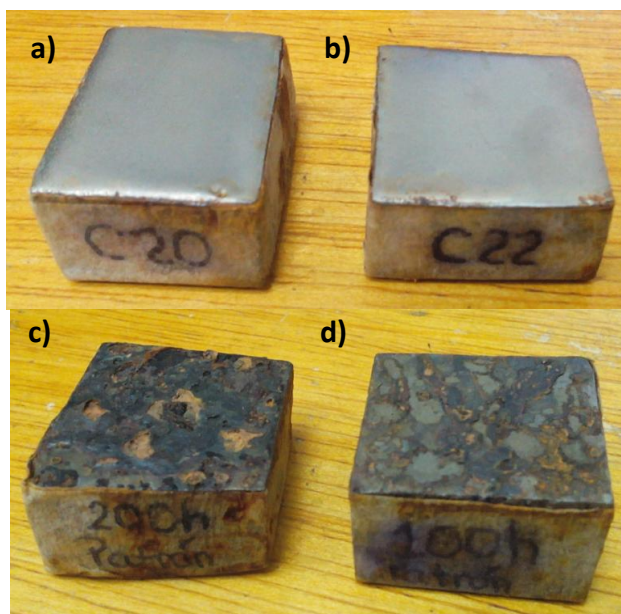


Figura 4. 78. Probetas expuestas a corrosión acelerada en cámara de niebla salina, a) Probeta sin corrosión en blindaje expuesta a 200h, b) Probeta sin corrosión en blindaje expuesta a 100h, c) Sustrato con corrosión uniforme expuesto a 200h, d) Sustrato con corrosión uniforme expuesto a 100h

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Los ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina han entregado resultados favorables para las probetas de acero AISI 1045 que fueron blindadas con aleación micropulverizada EUTALLOY 11496 por proyección térmica; el ambiente salino corrosivo al que se expone un virador de jugo de caña, es precisamente de características similares al ambiente de exposición dentro de la cámara, debido a que, la acidez del jugo de caña es una de las causas del deterioro de las piezas del molino, su pH está en el rango de 5.1 – 6.3. En este sentido los componentes químicos de la aleación EUTALLOY 11496, como son los carburos de cromo y de níquel, van a aportar a la resistencia a la corrosión del virador por medio del blindaje por proyección térmica.

4.4.- VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

HIPÓTESIS: El blindaje del acero AISI 1045 por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 influye en la resistencia al desgaste de la superficie.

Para verificar la hipótesis se tomarán en cuenta los valores que corresponden a la pérdida de peso (en realidad pérdida de masa ó material desgastado) que registran las probetas con blindaje y que fueron determinados mediante los ensayos de desgaste por abrasión y de desgaste por corrosión acelerada en la cámara de niebla salina.

Por tratarse de datos que corresponden a una distribución normal y con muestras menores a 30, este análisis estará sujeto a la comprobación estadística de acuerdo a la prueba T-student; la prueba T-student es una distribución de probabilidad que se utiliza para hacer estimaciones de la media de una variable (distribuida normalmente), en una población, cuando el tamaño de la muestra es pequeña.

Verificación de hipótesis para la resistencia al desgaste por abrasión

Condición:

- Análisis de prueba bilateral (dos colas)
- Si la probabilidad de error (P) es mayor que el nivel de significancia (α), se rechaza la hipótesis alternativa (H_a).
- Si la probabilidad de error (P) es menor que el nivel de significancia (α), se acepta la hipótesis alternativa (H_a).
- Hipótesis nula, H_0 : no hay diferencia entre medias
- Hipótesis alternativa, H_a : si hay diferencia entre medias
- Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ (utilizada en proyectos de investigación con una probabilidad del 95%).

A continuación, se ingresan los datos de los pesos inicial y final de las probetas con las mejores características de blindaje después del ensayo de desgaste por abrasión (Tabla

4.15), para con la ayuda de un software de análisis estadístico, determinar las medias, los grados de libertad, el valor estadístico (t), la probabilidad de error (P) y el valor crítico de (t) a dos colas. (Tabla 4.16)

Tabla 4. 15. Pesos antes y después del ensayo de desgaste abrasivo en probetas con blindaje

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso final (g)</i>
174,62	174,54
172,26	172,17
166,58	166,48
184,43	184,34
185,85	185,75
178,86	178,76

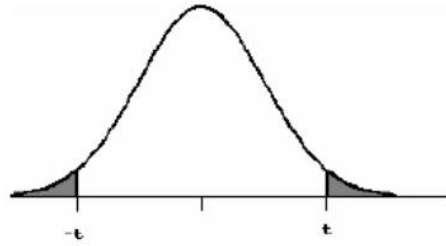
Tabla 4. 16. Resultados de la prueba T-student para la verificación de la hipótesis de acuerdo a los pesos inicial y final en el desgaste por abrasión

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

<i>Estadísticos</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso final (g)</i>
Media	177,1000	177,0072
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,021737511	
P(T<=t) dos colas	0,983084969	
Valor crítico de t (dos colas)	2,228138842	

Mendenhall W. & Beaver R. de “Introducción a la probabilidad y estadística”, indican que el valor crítico de (t) a dos colas que muestra la Tabla 4.16, también se lo puede encontrar en las tablas de distribución T-student a dos colas, a partir de los grados de libertad (10) y el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), como muestra la Figura 4.79.

Gráficamente, en la Figura 4.80, se pueden observar el valor del estadístico (t) calculado en el software de análisis y el valor crítico de (t) a dos colas; este último, es quien limita el área de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0 . (Según Mendenhall & Beaver de “Introducción a la probabilidad y estadística”, páginas 392-394)



(a) El área de las dos colas está sombreada en la figura.
 (b) Si H_A es direccional, las cabeceras de las columnas deben ser divididas por 2 cuando se acota el P-valor.

gl	ÁREA DE DOS COLAS						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	6366,198
2	1,886	2,920	4,303	6,695	9,925	31,598	99,992
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924	28,000
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	15,544
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	11,178
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	9,082
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7,885
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	7,120
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	6,594
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	6,211
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	5,921

Figura 4. 79. Valores de cuantiles de la distribución T-student
Fuente: Autor: Jorge Paredes

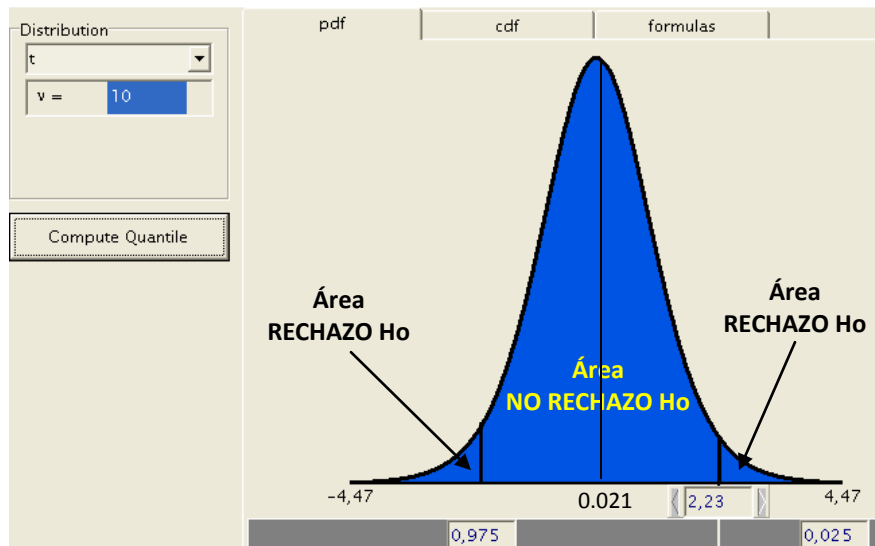


Figura 4. 80. Representación gráfica del valor crítico (t) y el valor estadístico calculado (t) en la zona de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0 .

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Interpretando los resultados obtenidos en la Tabla 4.16, se puede determinar que la diferencia entre las medias de los pesos inicial y final es 0.0928 gramos, también que la probabilidad de error (P) = 0.983084969 es mayor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$; de esta forma se ACEPTA la hipótesis nula H_0 , que dice, que no hay diferencia entre medias. En otras palabras se puede decir, que los 0.0928 gramos de pérdida de peso que sufre el material con blindaje después del desgaste abrasivo no es significativa, lo que indica una buena resistencia del blindaje al desgaste abrasivo.

Al trabajar con la regla de decisión, también se confirma la aceptación de la hipótesis nula H_0 , por razones que, en la Figura 4.80, el valor estadístico calculado ($t = 0.021737511$) se encuentra dentro del área de NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0 , con valores críticos de (t) a dos colas de 2.228138842.

Verificación de hipótesis para la resistencia a la corrosión

Condición:

- Análisis de prueba bilateral (dos colas)
- Si la probabilidad de error (P) es mayor que el nivel de significancia (α), se rechaza la hipótesis alternativa (H_a).
- Si la probabilidad de error (P) es menor que el nivel de significancia (α), se acepta la hipótesis alternativa (H_a).
- Hipótesis nula, H_0 : no hay diferencia entre medias
- Hipótesis alternativa, H_a : si hay diferencia entre medias
- Nivel de significancia $\alpha = 0,05$ (utilizada en proyectos de investigación con una probabilidad del 95%).

Similar al proceso anterior se presentan, la Tabla 4.17, que indica los valores de peso inicial y final de las muestras de acero con blindaje expuestas al ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina y la Tabla 4.18, que muestra los resultados estadísticos de la prueba T-student, obtenidos en el software de análisis estadístico.

Tabla 4. 17. Pesos antes y después del ensayo de corrosión acelerada en probetas con blindaje

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso final (g)</i>
44,519	44,457
55,358	55,297
50,263	50,181
51,247	51,208
55,718	55,651
65,042	64,993
55,564	55,524
42,537	42,461
49,727	49,654
61,682	61,602
66,446	66,394
42,131	42,119
55,408	55,382
65,264	65,153
53,953	53,947
51,107	51,065
50,856	50,836
55,293	55,173
59,903	59,895
50,217	50,178
53,381	53,360
44,339	44,2302
42,117	42,098
51,909	51,909

Tabla 4. 18. Resultados de la prueba T-student para la verificación de la hipótesis de acuerdo a los pesos inicial y final en el desgaste por corrosión acelerada

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

<i>Estadístico</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso final (g)</i>
Media	53,0825417	53,0319667
Grados de libertad	46	
Estadístico t	0,02465485	
P(T<=t) dos colas	0,98043692	
Valor crítico de t (dos colas)	2,01289557	

También para este caso, según Mendenhall & Beaver, el valor crítico de (t) a dos colas que muestra la Tabla 4.18, también se lo puede encontrar en las tablas de distribución T-student a dos colas, a partir de los grados de libertad (46) y el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$).

Gráficamente, en la Figura 4.81, se pueden observar el valor del estadístico (t) calculado en el software y el valor crítico de (t) a dos colas, limitados por las áreas de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0 . (Según Mendenhall & Beaver, de “Introducción a la probabilidad y estadística”)

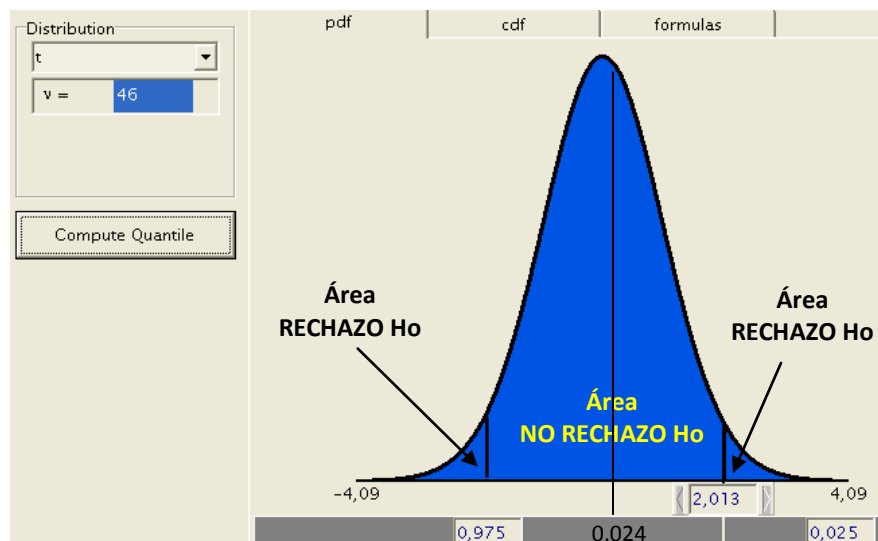


Figura 4. 81. Representación gráfica del valor crítico (t) y el valor estadístico calculado (t) en las áreas de RECHAZO y NO RECHAZO de la hipótesis nula H_0 .

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Interpretando los resultados obtenidos, se determina que la diferencia entre las medias de los pesos inicial y final es 0.0505 gramos, también que la probabilidad de error (P) = 0.98043692 es mayor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$; de esta forma se ACEPTA la hipótesis nula H_0 , que dice, que no hay diferencia entre medias. En otras palabras se puede decir, que los 0.0505 gramos de pérdida de peso que sufre el material con blindaje después del ensayo de corrosión acelerada, no es significativa, lo que indica una buena resistencia del blindaje al desgaste corrosivo. Así mismo por la regla de decisión el valor estadístico calculado ($t = 0.02465485$), está dentro de la zona de NO RECHAZO de H_0 .

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- CONCLUSIONES

- Queda establecido que una mejor superficie de adherencia (de mayor rugosidad) para el material de blindaje EUTALLOY 11496, la ofrece el proceso de sandblasting con abrasivo mineral compuesto por gránulos basálticos de origen volcánico, ya que sus partículas que están en el orden de 1.5mm (más grandes en comparación a las partículas de granalla metálica de 0.4mm) dejan una superficie con una rugosidad promedio de 4.77 mils (121.20 μm).
- Se consigue la adherencia del material de blindaje cuando la temperatura de precalentamiento del sustrato está entre 320 y 420°C; temperaturas alrededor de 200°C provocan el desprendimiento del material de blindaje, mala distribución del metal, gasto innecesario de consumibles (oxígeno, acetileno, metal de aporte). El rango de temperatura de precalentamiento del acero entre 320 y 420°C, está permitiendo que se frene la velocidad de enfriamiento en la zona de adherencia y es un proceso necesario para evitar el agrietamiento o mala adherencia del metal de aporte.
- El espesor de película del metal de blindaje determina su dureza superficial, espesores realizados entre 0.5 y 0.9mm han entregado valores promedio de dureza Brinell de 267.3 HB; superiores al valor promedio de dureza Brinell del sustrato que tiene 146.4 HB. Con la aplicación de espesores de blindaje mayores a 0.9mm es posible reforzar la zona superficial que se exponen al desgaste abrasivo; por otro lado, con espesores de blindaje menor a 0.5mm quedaría una película demasiado fina que expone al desgaste y degradación del material base o sustrato.
- La arena de sílice utilizada como material abrasivo en el ensayo de desgaste abrasivo, está dentro de los patrones establecidos por la ASTM G-65, teniendo un

porcentaje de retención en la base y pasante por el tamiz N° 60 del 92.70% con partículas del tamaño de 250µm; respecto a la humedad tiene el 0.06% en peso como promedio de 10 muestras y relacionado al flujo de la arena se tiene un promedio de 326.06 g/min.

- En el ensayo de desgaste abrasivo para el caso de las probetas que llevan blindaje y preparación de superficie por pulido mecánico y granallado, lo que primero se desgastó es la fina película de metal de blindaje, en algunos casos el desprendimiento de la película fue rápido lo que ocasionó que empiece a desgastarse el sustrato de manera desigual.
- Los materiales con mayor pérdida de volumen se presentaron en los sustratos de acero AISI 1045, con un promedio de 103.82 mm³, le siguen los sustratos que fueron blindados sobre una superficie preparada por pulido mecánico con un valor promedio de pérdida de volumen de 71.42 mm³, a continuación están los sustratos que recibieron blindaje sobre una superficie preparada por granallado metálico con un valor de pérdida de volumen de 28.83 mm³, y finalmente con los valores de menor pérdida de volumen de 11.83 mm³ están los sustratos que recibieron blindaje sobre una superficie preparada por sandblasting.
- Los parámetros que controlan y califican el adecuado funcionamiento de la máquina de ensayos de desgaste abrasivo, son el coeficiente de variación y la desviación estándar; en ambos casos cumple con lo establecido en la norma ASTM G-65, teniendo un valor promedio de 4.59% como coeficiente de variación y siendo un máximo del 6%, y para el caso de la desviación estándar se tiene un valor promedio de 1.95 mm³ para un máximo de 5.44 mm³. Debido a esto se establece que la máquina de ensayos se encuentra bajo control y los resultados no son erráticos.
- Los materiales con blindaje sobre una superficie preparada por sandblasting fueron los que obtuvieron un menor valor promedio de coeficiente de desgaste abrasivo (K), con un valor de 0.051 mm³/Nm, en cambio los de mayor coeficiente de desgaste abrasivo son los sustratos de acero AISI 1045, con un valor promedio de

0.281 mm³/Nm. El coeficiente de desgaste abrasivo (K) ó también denominado tasa de desgaste por abrasión, tendrá un menor valor cuando la dureza del blindaje se incremente, y en este caso se obtuvo un incremento de dureza superficial en el blindaje hasta el 94% de la dureza del sustrato.

- Se establece que, con la dureza del sustrato de 146.4 HB la pérdida de volumen es mayor, con un valor de 105.30 mm³, entonces al incrementar la dureza superficial, por medio del blindaje se consigue una dureza de 267.3 HB, obteniendo menores pérdidas de volumen como 11.34 mm³; es decir, la dureza es inversamente proporcional a la pérdida de volumen.
- Así mismo, calculando la inversa de la pérdida de volumen, a quien se le denomina resistencia al desgaste abrasivo, se tiene que, mientras mayor dureza superficial presente el material, mayor será su resistencia al desgaste abrasivo; debido a esto los materiales se describen como aquellos que tienen “buena o mala” resistencia al desgaste abrasivo, de tal forma se tiene que, el sustrato con una dureza de 146.4 HB tiene una resistencia al desgaste abrasivo en valor numérico de 0.0095, y si se incrementa la dureza de la superficie del sustrato por medio del blindaje se tiene una dureza de 267.3 HB resultando una resistencia al desgaste abrasivo en valor numérico de 0.0882. En este último caso se puede definir que, el acero AISI 1045 con blindaje de aleación micropulverizada EUTALLOY 11496 sobre una superficie preparada por sandblasting mineral (gránulos basálticos) tiene BUENA resistencia al desgaste abrasivo.
- El blindaje del acero AISI 1045 con aleación micropulverizada EUTALLOY 11496, permitirá obtener una buena resistencia a la corrosión, siempre y cuando el proceso de proyección térmica evite la generación de defectos superficiales como poros o grietas, ya que estos defectos serán los “focos” para el inicio del proceso corrosivo y por ende la degradación del material. Las tasas de corrosión para un adecuado blindaje pueden ser de 0.0659 mm/yr, diferentes a las tasas de corrosión que se presentan en un blindaje con grietas y poros con valores hasta 1.8382 mm/yr, y muy

diferentes a las tasas de corrosión de un material sin blindaje como es 2.7999 mm/yr cuando la exposición fue a 200 horas en la cámara de niebla salina.

- La velocidad de corrosión (en mm/yr) representada en la Figura 4.74 para una exposición acelerada a 100 horas y en la Figura 4.76 para una exposición acelerada a 200 horas, muestran la degradación (pérdida de material) del sustrato en comparación a las probetas con blindaje independiente del proceso de preparación superficial; su ubicación ascendente en las gráficas dependen del tamaño o tipo de defecto encontrado en el blindaje, lo que permitió el inicio de la corrosión en las zonas “desprotegidas” y por ende una mayor velocidad de corrosión.
- Los elementos constituyentes de la aleación micropulverizada EUTALLOY 11496, como son el cromo, níquel y mediante el nexo con el carbono, han permitido que la formación de carburos de cromo y carburos de níquel ayuden a la resistencia a la corrosión en las exposiciones dentro de la cámara de niebla salina a 100 y 200 horas. En diferente sentido los demás elementos constituyentes como son el silicio, el boro y así mismo mediante el nexo con el carbono, han permitido la formación de carburos de silicio y carburos de boro, elementos que han ayudado a adquirir dureza superficial en el blindaje y por ende resistencia al desgaste abrasivo.

5.2.- RECOMENDACIONES

- Es importante que el material abrasivo a utilizar en el ensayo de desgaste por abrasión cumpla con lo solicitado en la Norma ASTM G-65, las variables a controlar son la granulometría, que especifica tener un mayor porcentaje de retención en el tamiz N° 70, obteniendo el 95% con tamaño de partícula 212 μm ; así mismo el contenido de humedad de acuerdo a la norma indica que no debe exceder el 0.5% en peso.
- También es recomendable que el material abrasivo que se utiliza para los ensayos de desgaste por abrasión, máximo sea utilizado dos veces, por razones, que en el

material abrasivo usado se presentan partículas de caucho pertenecientes a la rueda y partículas de material metálico que pertenecen a la probeta; ambos pueden interferir en los resultados.

- Los resultados han indicado que el uso de un abrasivo mineral de naturaleza volcánica para el sandblasting, como lo es el granulo basáltico, permite obtener una mejor superficie de anclaje para el proceso de blindaje por proyección térmica; las partículas recomendadas deben estar en el orden de 1.5mm o más.
- Es necesario medir constantemente la temperatura de precalentamiento del sustrato previo al proceso de blindaje por proyección térmica, esto garantizará una adecuada adherencia del metal de blindaje sobre la superficie del sustrato; temperaturas de precalentamiento por debajo de 300°C ocasionan que el material de blindaje no se funda correctamente y no se adhiera a la superficie. Si es posible el uso de un sistema de control que mida la temperatura de una forma más estable como lo es un banco de resistencias eléctricas, a diferencia de un termómetro infrarrojo.
- Los procesos de deposición de metales como lo es la proyección térmica, por naturaleza y porque son procesos de aplicación manual, son productores de defectos superficiales en los recubrimientos, como son porosidad y óxidos, y que son difíciles de observar a simple vista; las técnicas de microscopía permiten analizar el acabado superficial que dejó el blindaje, permitiendo realizar correcciones en las futuras aplicaciones y evitar al máximo la presencia de defectología.
- En el proceso de blindaje por proyección térmica una variable muy importante a controlar es la presión de los gases que producen la combustión, sean estos, el oxígeno y el acetileno; inicialmente se dejan graduadas las presiones en los envases, pero hay que considerar que a medida que se van utilizando los gases, la presión dentro del envase se reduce e influye en la presión de salida. Un indicador para saber si la presión de ambos gases en la antorcha es la adecuada, es el color de la llama en la boquilla, esta se muestra de color azul-amarillo en tono bajo, y en el

núcleo de la llama se visibiliza un pequeño círculo de aspecto a una gota de agua. La mezcla de ambos gases en la presión y cantidad adecuada, permitirá la fundición del polvo de aleación metálica y su distribución homogénea en la superficie.

- El desarrollo de todos los ensayos se han realizado con equipos portátiles profesionales y equipos de laboratorio, que en su totalidad fueron calibrados desde cero, consiguiendo así, que el margen de error en los resultados sea el menor posible; el uso de equipos de medición que incluyen sus patrones de calibración son de gran importancia en la adquisición de datos.
- Como se mencionó antes, los procesos de deposición de aleaciones metálicas son generadoras de defectos, debido a esto, es preciso controlar al máximo que el proceso de proyección térmica sea realizado de forma adecuada, ya que la mínima grieta o porosidad, puede ser la promotora de reducir la resistencia al desgaste abrasivo y corrosivo de la superficie.
- Los ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, son sólo pruebas experimentales que se asemejan a la realidad, pero nunca podrán reemplazar a los ensayos de corrosión a largo plazo, en donde juegan un papel importante las condiciones del entorno y las variables físico-químicas del proceso.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA EN LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE UN VIRADOR DE MOLINO DE CAÑA DEL INGENIO AZUCARERO SAN JUAN

6.1.- DATOS INFORMATIVOS

Después de haber realizado el Análisis del blindaje por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496, en muestras de acero AISI 1045 pertenecientes al virador de caña del molino 1 del Ingenio Azucarero San Juan, se consiguió establecer que se obtiene una mejor resistencia al desgaste abrasivo, cuando inicialmente la superficie es preparada mediante un proceso de sandblasting y mediante el uso de material abrasivo de naturaleza mineral, como lo es, la roca volcánica en forma de gránulos basálticos con tamaño de partículas en el orden de 1.5mm.

Debido a esto, se ha conseguido que la dureza superficial del blindaje supere hasta en un 75% la dureza del acero AISI 1045 común y corriente; de esta forma, se ha verificado también que la resistencia al desgaste abrasivo, se incrementa a medida que la dureza también lo hace. Esto se logró verificar mediante los ensayos de desgaste abrasivo de acuerdo a la norma ASTM G-65.

Por otra parte, se verificó también que, la resistencia a la corrosión del blindaje es buena, siempre y cuando se garantice que no existan defectos superficiales, como consecuencia del proceso de proyección térmica. Las tasas de corrosión obtenidas en el blindaje son bajas, a diferencia del acero AISI 1045, que fueron expuestos ambos en condiciones de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina, de acuerdo a la norma ASTM B-117.

Con estas dos condiciones de desgaste del virador (abrasión y corrosión) controladas, se está aportando de forma investigativa al campo de la industria azucarera, sector molienda, por las razones que, un virador que lleva un adecuado blindaje, presentará una mejor resistencia al desgaste ante un medio agresivo que incluye materias extrañas que vienen en la caña (hojas, cogollo, raíces, piezas metálicas, piedra, arena, etc.) y a la acidez del jugo de caña, que es causante también del deterioro de las piezas del molino por efecto de la corrosión.

La presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones de Energías del Agro S.A. ubicada en Playas Villamil Provincia del Guayas, en lo que respecta a, corte y pulido mecánico de las muestras, proceso de blindaje, mediciones de espesores, pesos, rugosidades, durezas, granulometría y humedad; por otra parte, en el Laboratorio de Materiales Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, ubicada en la ciudad de Quito Provincia del Pichincha, se realizaron los ensayos de corrosión en cámara de niebla salina. Los procesos de preparación superficial, como son, el sandblasting y el gritblasting, se realizaron en las instalaciones de FADE S.P. ubicado en Pifo en la ciudad de Quito Los ensayos de desgaste por abrasión, metalografía, microscopía óptica y SEM, se realizaron en los Laboratorios de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, ubicados en la ciudad de Ambato provincia del Tungurahua.

6.2.- ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Se han registrado investigaciones similares en lo que a recubrimientos duros en cuchillas centrales de molinos se refiere, pero mediante la protección por arco eléctrico y electrodo revestido, es así que, en el año 2002 Adolfo Falcón egresado de la ESPOL, realizó estudios de adherencia de metal de aporte sobre las cuchillas centrales, variando los parámetros de soldadura y el tipo de electrodo; llegando a la conclusión que recuperar los dientes con electrodo tipo E7018, no es conveniente, debido a que la dureza del depósito es menor a la dureza del metal base, a diferencia de los depósitos con electrodos que forman carburos de cromo que ayudaron a mejorar la dureza y molibdeno para la resistencia a la corrosión.

Así mismo, Ronny Aroca, egresado de la ESPOL, en el 2010 realiza un análisis de recubrimientos duros pero en este caso como elemento de protección contra el desgaste de masas de los molinos de caña, mediante el uso de soldadura por arco; evidenciando mejora en las propiedades de la superficie de las masas, al aplicar recubrimientos de fundiciones blancas de alto cromo, en especial en la resistencia a la corrosión.

Por otro lado en el año 2002, en la Universidad de Camagüey – Cuba, J. Hernández de la Torre, realiza la caracterización de resistencia de las cuchillas centrales para molinos azucareros, mediante el análisis de elementos finitos y empleando técnicas de métodos numéricos que presenta el paquete COSMOS; llegando a determinar que los mayores valores de esfuerzos y desplazamientos se encuentran localizados en la punta de las cuchillas (dientes), por lo que recomienda realizar en las futuras investigaciones un proceso de endurecimiento superficial para esta zona que está expuesta al desgaste abrasivo.

En lo que respecta a esta investigación, se ha caracterizado el blindaje por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 en muestras de acero AISI 1045 pertenecientes al virador (cuchilla central) del molino de caña 1 del Ingenio Azucarero San Juan; encontrando los mejores resultados de resistencia al desgaste abrasivo y a la corrosión, en las probetas que llevan blindaje sin presencia de defectos y que tuvieron una preparación superficial por sandblasting con el uso de abrasivo mineral de naturaleza volcánica.

Los ensayos de desgaste abrasivo y el de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, estuvieron basados en las normas ASTM G-65 y ASTM B-117, respectivamente.

6.3.- JUSTIFICACIÓN

El blindaje de los flancos de los dientes del virador de molino de caña, permitirá incrementar su vida útil, en propiedades como, el incremento en la dureza superficial y por ende incrementar la resistencia al desgaste abrasivo, cuando está sometido a entornos agresivos dentro del molino tales como la materia extraña que trae la caña desde los

cañaverales hacia la zona de molienda; sean estas materias extrañas: hojas, raíces, cogollos, piezas de metal que pudieron desprenderse de las herramientas de corte de caña, piedras, arena, etc. Las hojas de la caña tienen gran contenido de sílice y estas a su vez traen al molino gran cantidad de arena, factores que aumentan el desgaste por abrasión de las piezas.

Así mismo, con el blindaje se desea incrementar la resistencia a la corrosión, ya que la acidez del jugo de caña (5.1 – 6.3 pH) es otra de las principales causas del deterioro de las piezas del molino; incluyendo también el ambiente marítimo salino debido a las cercanías del ingenio a las costas del mar.

6.4. - OBJETIVOS

6.4.1.- OBJETIVO GENERAL

Elaborar un procedimiento de blindaje por proyección térmica en los flancos de los dientes de un virador de molino de caña del Ingenio Azucarero San Juan.

6.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el blindaje de los flancos de los dientes del virador por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496
- Verificar las propiedades del blindaje
- Determinar la distribución estadística de la vida del blindaje representada por la distribución de Weibull

6.5.- ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

La presente propuesta es factible de realizarla ya que se cuenta con las instalaciones debidamente equipadas como es el taller de metalmecánica de Energías del Agro S.A. ubicado en Playas Villamil Provincia del Guayas; el mencionado taller cuenta con los envases de gases de oxígeno y acetileno, el quipo de proyección térmica, el equipo de sandblasting para la preparación de la superficie, los equipos de medición para rugosidad, espesor, temperatura y dureza.

El virador disponible para el blindaje de los flancos de los dientes será del molino 2, y se va a adquirir la cantidad necesaria de aleación metálica micropulverizada Eutalloy 11496 en la empresa SAGER. Se cuenta también con el personal calificado para realizar el sandblasting, la proyección térmica y además con las herramientas estadísticas necesarias para el análisis de los resultados.

6.6.- FUNDAMENTACIÓN

La presente propuesta se basa en la información detallada en los capítulos del marco teórico, presentación y análisis de los resultados y conclusiones, en las cuales se fundamenta teórica y experimentalmente las propiedades de resistencia al desgaste superficial al que se expone un virador de caña, sean estas, la resistencia al desgaste abrasivo y la resistencia al desgaste corrosivo; obteniendo en ambos casos resultados favorables al blindaje del acero AISI 1045 con preparación superficial de sandblasting mediante el uso de material abrasivo mineral de naturaleza volcánica, cuyas partículas están en el orden de tamaño de 1.5mm.

6.7.- METODOLOGÍA

Las actividades a seguir para el desarrollo del presente análisis se presentan en el siguiente diagrama de flujo:

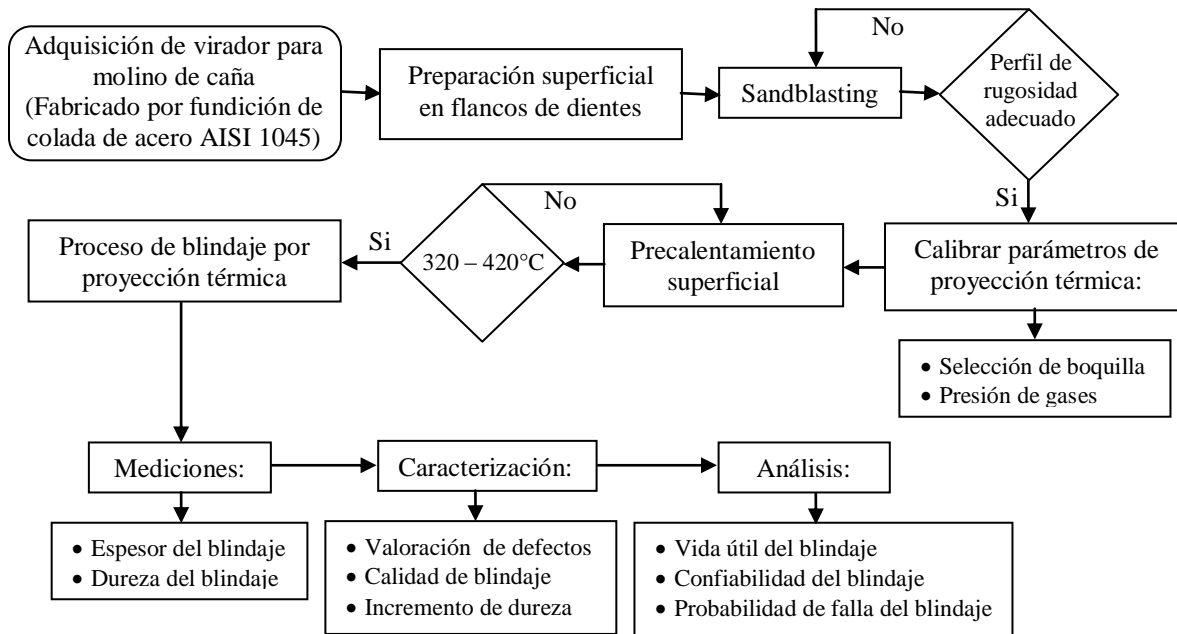


Gráfico 6.1 Metodología para el blindaje de los flancos de dientes de un virador de molino de caña
Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.1.- PREPARACIÓN SUPERFICIAL Y RUGOSIDAD

Para la preparación superficial del virador por sandblasting se utiliza como material abrasivo, un granulo basáltico de origen volcánico; este material abrasivo de lo adquirió en VITECAL y tiene como característica que sus partículas son extraídas al 100% de roca volcánica, tienen una alta pureza en sílice y el tamaño de sus partículas esta en el orden de 1.5mm. La Figura 6.1, muestra el material abrasivo de origen volcánico.



Figura 6. 1. Material abrasivo mineral VITECAL para sandblasting

Fuente: Autor: Jorge Paredes

El material abrasivo se carga en la tolva de alimentación (Figura 6.2) y seguidamente se procede a realizar el sandblasting de la superficie del virador.



Figura 6. 2. Alimentación de material abrasivo en tolva de equipo sandblasting

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Una vez realizado el sandblasting, el aspecto de los flancos del virador queda como se muestra en la Figura 6.3, con una superficie libre de suciedad, incrustaciones, grasas y lubricantes, que puedan interferir con el anclaje de la aleación metálica.



Figura 6. 3. Flancos de los dientes del virador después del sandblasting

Fuente: Autor: Jorge Paredes

De acuerdo a la parte experimental del capítulo 4, referente a la rugosidad superficial y según la Tabla 4.1, se tiene que la rugosidad promedio para conseguir un adecuado anclaje de la aleación metálica micropulverizada Eutalloy 11496 sobre la superficie del acero AISI 1045, es de 4.7 mils o equivalente a $121.2 \mu\text{m}$; este valor será un parámetro guía para conseguir la rugosidad deseada en los flancos de los dientes.

Adicionalmente, si se desea relacionar este valor de rugosidad de 4.7 mils, con una norma que regule la medición del perfil de la superficie después de prepararse o limpiarse con un

material abrasivo, se tiene que, la NACE (National Association of Corrosion Engineers), especifica unos valores referenciales de perfil de superficie según la NACE Standard RP0287-2002 ^[15]; estos valores se presentan en la Tabla 6.1, y de acuerdo a esto, el valor de 4.7 mils de rugosidad se podría interpretar que es una preparación de superficie tipo NACE No. 1/SSPC-SP 5, ya que sus límites de perfil de superficie están en el rango de 3.47 – 4.63 mils. Es preciso recordar también, que 1 mil es equivalente a 25.4 μm .

Tabla 6. 1. Valores de perfil de superficie según la norma NACE RP0287-2002.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Number		Microscope Readings			Replica Tape Readings		
		Avg.	95% Confidence Limits ^(B)		Avg.	95% Confidence Limits ^(B)	
			Low	High		Low	High
1.	S230 NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.72	2.41	3.03	2.79	2.57	3.00
2.	S230 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.02	1.54	2.49	2.36	2.28	2.43
3.	S390 NACE No. 1/SSPC-SP 5	4.05	3.47	4.63	4.17	4.01	4.33
4.	S390 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.38	3.33	3.76	3.44	40.8
5.	GL-50 NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.31	2.15	2.48	2.39	2.06	2.71
6.	GL-50 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.00	1.81	2.19	2.39	2.22	2.55
7.	GL-25 NACE No. 1/SSPC-SP 5	3.94	3.41	4.47	4.10	3.85	4.35
8.	GL-25 NACE No. 3/SSPC-SP 6	3.46	2.88	4.04	3.71	3.32	4.10
9.	BB4016 NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.14	1.93	2.35	2.24	1.71	2.78
10.	BB4016 NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.87	1.74	1.99	2.24	2.05	2.43
11.	16/40 Sand NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.22	2.04	2.41	1.93	1.74	2.18
12.	16/40 Sand NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.89	1.72	2.05	1.90	1.72	2.08
13.	12/20 Al ₂ O ₃ NACE No. 2/SSPC-SP 10	3.18	2.93	3.44	2.79	2.69	2.88
14.	12/30 Al ₂ O ₃ NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.59	3.11	2.73	2.58	2.88

La Figura 6.4, muestra la medición de la rugosidad en los flancos de los dientes del virador que se encontró en el orden de 4.5 mils (114.3 μm). (Anexo D1)



Figura 6. 4. Medición de la rugosidad en los flancos de los dientes del virador

Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.2.- CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN TÉRMICA

Los parámetros a controlar previo al proceso de proyección térmica, son las presiones de los gases que hacen posible la combustión de la aleación metálica micropulverizada; estos gases son el oxígeno y el acetileno; estas presiones se calibran de acuerdo a la boquilla que se utilice. Los tipos de boquillas y las presiones de trabajo que recomienda el equipo SUPERJET-S se muestran en la Figura 6.5, y su uso se detalla a continuación:

- Boquilla A0 S: útil para recargues puntuales de precisión
- Boquillas A1 S y A2 S: útil para precisión lineal
- Boquillas B3 S y B4 S: son boquillas intermedias estándar
- Boquilla C5 S: es la boquilla de mayor potencia

Tip assembly	Oxygen		Acetylene	
	bar	psi	bar	psi
A0 S	1,5	22	0,5	7,5
A1 S	2,0	30	0,5	7,5
A2 S	2,5	37	0,5	7,5
B3 S	2,5	37	0,6	9,0
B4 S	2,5	37	0,6	9,0
C5 S	4,0	60	1,0	15,0

Figura 6. 5. Placa de especificación de presiones de trabajo para los gases, oxígeno y acetileno

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Para el caso del blindaje de los flancos de los dientes del virador se utilizará una de las boquillas intermedias estándar, B3 S, y de acuerdo a eso las presiones para el oxígeno y acetileno son 37 y 9.0 psi, respectivamente. (Figura 6.6).



Figura 6. 6. Presiones configuradas para los gases, oxígeno y acetileno

Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.3.- PRECALENTAMIENTO SUPERFICIAL

La temperatura de precalentamiento de la superficie, es un aspecto muy importante a controlar, debido a que, en la parte experimental del capítulo 4, se evidenció que si la temperatura de precalentamiento de la superficie se encuentra por debajo de 200°C, existe desprendimiento del material de aporte, debido a una mala fundición del polvo metálico sobre la superficie del acero.

Los mejores resultados se obtuvieron, cuando la temperatura de precalentamiento de la superficie, estuvo en el rango de 320 y 420°C; de acuerdo a esto se controló que la temperatura de precalentamiento de los flancos de los dientes del virador se encuentren dentro de lo estimado. (Figura 6.7).

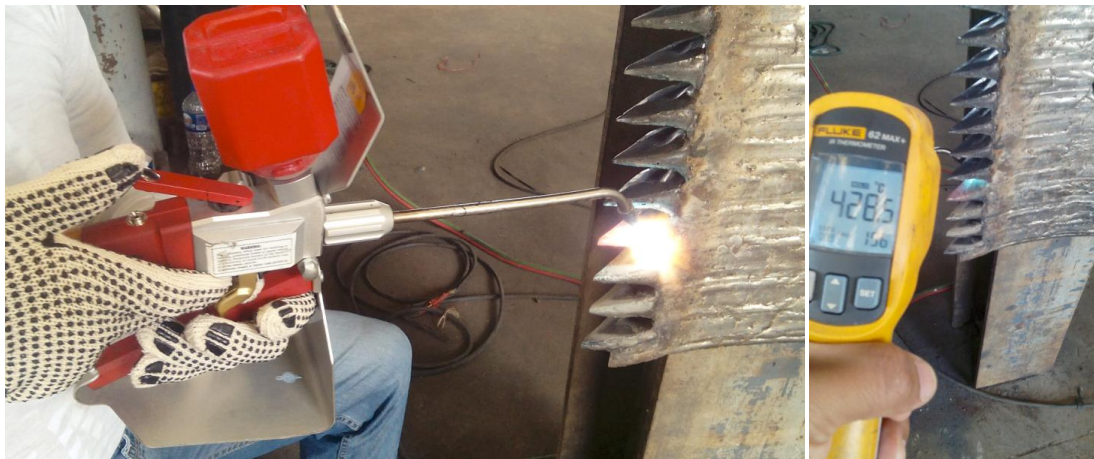


Figura 6. 7. Precalentamiento de los flancos de los dientes del virador, con un control de temperatura entre 320 y 420°C

Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.4.- PROCESO DE BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA

Inmediato al precalentamiento de la superficie, se procede a depositar el polvo metálico sobre la superficie de los flancos de los dientes; esto se hace presionando el gatillo de la antorcha y debe realizarse depositando de manera uniforme sobre la superficie, evitando

formar aglomeraciones de polvo metálico y evitando también dejar zonas vacías sin metal de aporte.

Una vez distribuido uniformemente el polvo metálico sobre la superficie de los flancos de los dientes, se procede a fundirlo, visualizando que fluya y que se distribuya en toda la superficie. La técnica que se adquiriera en este proceso, garantizará la calidad del blindaje, en términos de evitar la presencia de defectos superficiales como son grietas y poros. Del espesor que se necesite conseguir, dependerá la cantidad de pases a realizar; en este caso y de acuerdo a los resultados obtenidos en la parte experimental del capítulo 4, se desea conseguir un espesor que se aproxime a 1mm, de tal manera que únicamente se realizó un pase de polvo metálico. La Figura 6.8, muestra la aplicación del blindaje en un sector de los flancos de los dientes del virador.



Figura 6. 8. Aplicación del blindaje en los flancos de los dientes del virador

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Es preciso mencionar que, el precalentamiento se lo realiza en pequeñas zonas, para inmediatamente aplicar la aleación micropulverizada, ya que si se precalientan zonas extensas, hasta aplicar la aleación en un extremo, en el otro extremo la superficie empieza a perder temperatura y como se mencionó antes, el material de aporte no se funde y pierde adherencia.

También se debe mencionar, que las temperaturas de precalentamiento y de blindaje, generan esfuerzos y deformaciones en todo el virador, es por eso, que en la Figura 6.8 la aplicación del blindaje se lo realiza con el virador sujeto rígidamente a una base; con la finalidad de evitar que el virador se deforme y considerando que es un elemento de precisión, evitar que existan interferencias con las masas en el momento del montaje.

6.7.5.- MEDICIÓN DEL ESPESOR DE BLINDAJE

En base a los resultados obtenidos en la experimentación del capítulo 4, el objetivo es obtener un espesor de blindaje lo más uniforme posible y que se asemeje a los valores de espesor que presentaron buenos resultados relacionados a la resistencia al desgaste abrasivo y a la resistencia al desgaste corrosivo; aunque este último depende más de la calidad del blindaje que se realizó, tomando en cuenta que en la superficie no deben existir defectos como poros y grietas.

La Figura 6.9, muestra la comparación de espesores antes y después del blindaje, tomado en uno de los flancos de los dientes del virador. Los demás valores de espesor se muestran en el Anexo D1. Es preciso previo a la medición que se calibre en cero el equipo.



Figura 6. 9. Medición de espesor en los flancos de los dientes del virador, a) calibración en cero del equipo, b) medición antes del blindaje, c) medición después del blindaje

Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.6.- MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL BLINDAJE

Para verificar la dureza del blindaje, primero es necesaria la calibración del equipo (Figura 6.10), esto se lo realiza con el patrón que viene incorporado y de similar manera como se realizó en la parte experimental del capítulo 4; después de esto se procede a medir la dureza de los flancos de los dientes, para después relacionar este valor con la dureza inicial. Se han obtenido en promedio un incremento de la dureza brinell del blindaje hasta el 59% con respecto a la dureza del material. (Anexo D1).

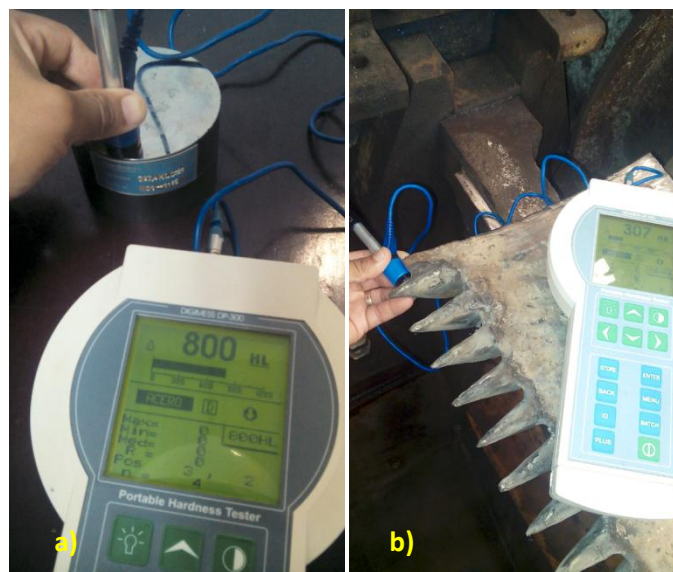


Figura 6. 10. Medición de dureza brinell en blindaje, a) Calibración del equipo, b) Registro de dureza brinell

Fuente: Autor: Jorge Paredes

6.7.7.- CARACTERIZACIÓN DEL BLINDAJE

El blindaje ó recubrimiento de aleación micropulverizada Eutalloy 11496, si lo analizamos con técnicas microscópicas, debe caracterizarse por los siguientes aspectos:

- Debe presentar una distribución uniforme sobre la superficie del sustrato, en este caso sobre la superficie de los flancos de los dientes del virador, en la Figura 6.11, se pueden observar los depósitos de aleación metálica aplicados a un pase sobre la superficie y distribuidos uniformemente sin dejar vacíos o aglomeraciones de polvo sin

fundir. Uno de los aleantes del polvo metálico que se encarga de generar fluidez en la deposición es el boro, ya que actúa como agente fundente.

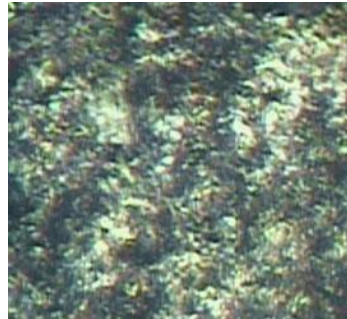


Figura 6. 11. Material de blindaje distribuido de manera uniforme en la superficie, imagen microscópica a 200X

Fuente: Autor: Jorge Paredes

- Otro de los aspectos es verificar microscópicamente que no existan defectos superficiales en el blindaje, ya que en la parte experimental del capítulo 4, se pudo determinar que un simple poro o grieta, se convierte en el “foco” de inicio de la degradación del material por efecto de la acumulación de sustancias corrosivas; esto se pudo constatar en el ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina, con tiempos de exposición 100 y 200 horas. La Figura 6.12, muestra un ejemplo de porosidad que se presenta en el blindaje y como incide esta ante un entorno corrosivo.

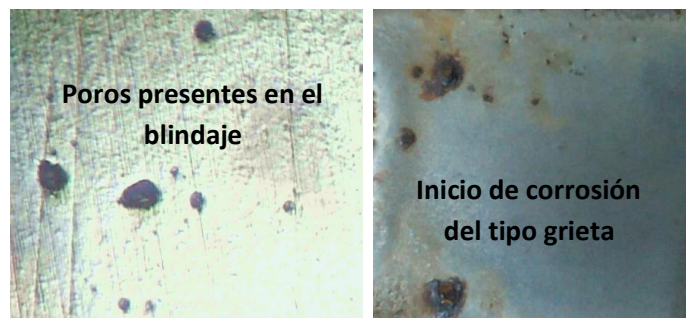


Figura 6. 12. Corrosión por grietas debido a la acumulación de sustancias salinas en el blindaje

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En este aspecto, aunque el cromo y el níquel presentes en la aleación metálica, trabajan en pro de la resistencia a la corrosión del material, bastará con un defecto superficial

para que inicie el proceso de degradación puntual, hasta que se contamine toda la superficie.

- Finalmente se tiene que, la dureza del blindaje debe reflejar un incremento con respecto al sustrato, de aproximadamente el 50%; esto ha sido verificado en el procedimiento experimental del capítulo 4. Los elementos aleantes del polvo metálico destinado al blindaje y que aportan a la dureza superficial, son el silicio y el boro, ya que al combinarse con el carbono, permitirá la formación de carburos de silicio y carburos de boro, favoreciendo con ellos a la resistencia al desgaste por abrasión.

Este procedimiento queda establecido en el Anexo D3.

6.7.8.- ANÁLISIS DE LA VIDA ÚTIL DEL BLINDAJE

Las consideraciones que se tomaron en cuenta para desarrollar el criterio de vida útil del blindaje se basaron en el Tribology Handbook “Friction Wear Lubrication”, en donde se estudia el fenómeno del desgaste de acuerdo al contacto entre superficies, demostrando que hay influencia de la presión de contacto sobre la intensidad del desgaste de las superficies asentadas; de acuerdo a aquello, el autor Kragelsky presenta la siguiente ecuación de vida útil: ^[16]

$$V_u = \frac{\text{Masa del perfil de ataque} * \text{tiempo ensayo al desgaste de las probetas}}{\text{peso perdido de las probetas ensayadas}} \quad \text{Ec. 6.1}$$

Para la ecuación anterior, el dato que no se conoce es la masa del perfil de ataque, que en este caso es, la masa del espesor de blindaje de todos los flancos de los dientes del virador; es por eso, que con la ayuda de un software, se procede a modelar el virador de caña del molino (Figura 6.13), para determinar la masa del perfil de ataque de todos los flancos de los dientes. Los demás factores de la ecuación 6.1, son conocidos de acuerdo a la parte experimental del capítulo 4, sean estos, el tiempo de duración del ensayo de desgaste por abrasión que fue de 11 minutos, el peso perdido de las probetas ensayadas, será, el peso

perdido de las probetas que presentaron mejor comportamiento al desgaste abrasivo, siendo estas, las de blindaje con preparación superficial por sandblasting y según la Tabla 4.11 el valor promedio de pérdida de peso es 0.0928 gramos.

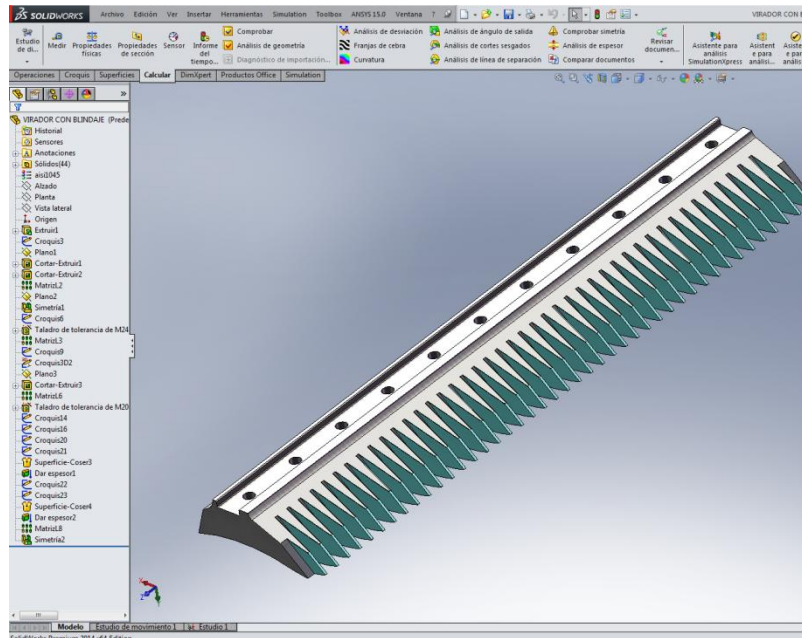


Figura 6. 13. Modelado en software de los flancos de los dientes del virador del molino de caña

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En el software se modelaron los flancos de los dientes como un elemento independiente del virador, con la finalidad de poder seleccionarlos y calcular su masa; de acuerdo a esto, se tomó el criterio de iterar el espesor de blindaje entre 0.5 a 1.3 mm para obtener la masa de los flancos de los dientes según el espesor de blindaje.

La Figura 6.14, muestra el gestor de propiedades mecánicas del software, en donde se puede visualizar el valor de la masa de los flancos de los dientes del virador, que será también el valor de la masa del perfil de ataque que solicita la ecuación 6.1; de acuerdo a esto se presenta también la Tabla 6.2, misma que indica la masa de los flancos de los dientes, según determinado espesor.

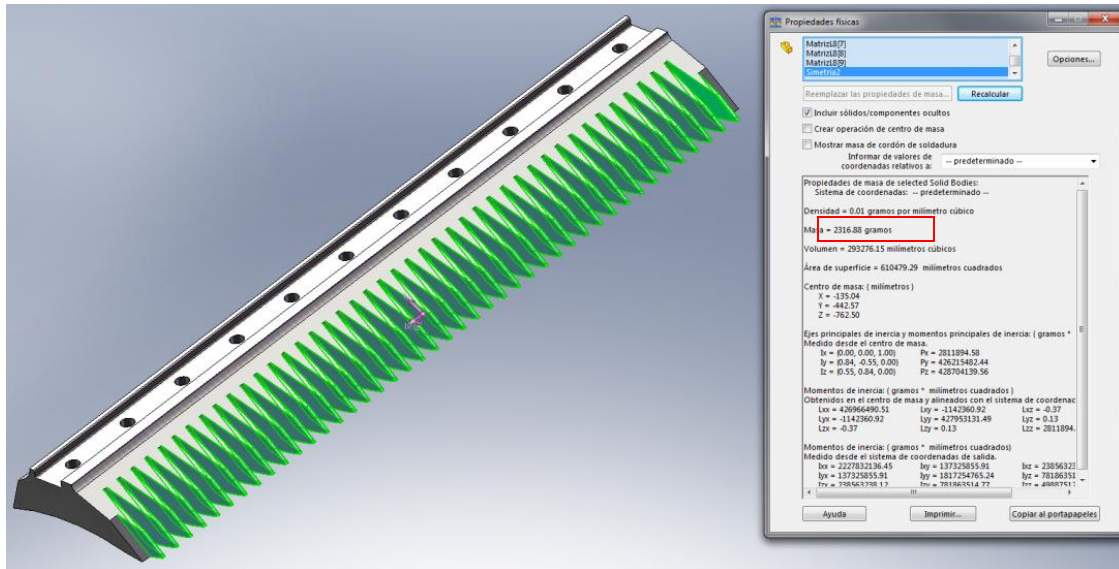


Figura 6. 14. Gestor de propiedades mecánicas del software que indica la masa de los flancos de los dientes del virador

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Tabla 6. 2. Valores de la masa de los flancos de los dientes según el espesor modelado
(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Espesor (mm)	Masa (g)
0,50	1191,19
0,60	1415,27
0,70	1639,89
0,80	1865,03
0,90	2090,69
1,00	2316,88
1,10	2543,60
1,20	2770,84
1,30	2998,60

Con los valores de la masa de los flancos de los dientes del virador, el tiempo de duración del ensayo de desgaste abrasivo de las probetas, el peso perdido de las probetas ensayadas y con la ecuación 6.1, se calcula la vida útil del blindaje según el espesor aplicado; los resultados se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6. 3. Valores de vida útil del blindaje según el espesor

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Espesor de blindaje (mm)	Tiempo ensayo (min)	Masa ataque (g)	Peso perdido (g)	Vida útil blindaje (días)
0,50	11,0	1191,19	0,0928	98,05
0,60	11,0	1415,27	0,0928	116,50
0,70	11,0	1639,89	0,0928	134,99
0,80	11,0	1865,03	0,0928	153,52
0,90	11,0	2090,69	0,0928	172,10
1,00	11,0	2316,88	0,0928	190,72
1,10	11,0	2543,60	0,0928	209,38
1,20	11,0	2770,84	0,0928	228,08
1,30	11,0	2998,60	0,0928	246,83

De acuerdo a este criterio de cálculo y según la Tabla 6.3, se puede decir que para que el blindaje de los flancos de los dientes del virador de molino de caña resista los 8 meses de duración de la zafra (240 días) ante un medio de desgaste abrasivo y corrosivo, éste deberá tener un espesor de 1.3mm.

6.7.9.- ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD DEL BLINDAJE POR LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

6.7.9.1.- DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

De acuerdo al Weibull Handbook ^[17], la distribución de Weibull se utiliza frecuentemente en análisis de fiabilidad para modelar datos de tiempo por falla, como por ejemplo, la probabilidad de que una parte falle después de uno, dos o más años. La distribución de Weibull se describe según los parámetros de forma, escala y valor umbral.

Para el análisis de Weibull, es necesario conocer el significado del término “falla”, y de acuerdo al Weibull Handbook, la falla se refiere a cualquier incidente o condición que cause la degradación de un producto, proceso o material de tal forma que ya no pueda realizar las funciones de una manera segura, confiable y a un costo razonable para el que fue concebido; estas fallas ocurren de manera incierta y son influenciadas por el diseño,

manufactura o construcción, mantenimiento y operación, así como también factores humanos.

Existe una curva típica de fallos (curva de la bañera) que representa los diferentes tipos de falla que un equipo o componente del mismo sufre durante el periodo de tiempo desde su puesta en operación hasta que termina su ciclo de vida útil. La Figura 6.15, muestra la curva representativa de los tres componentes que forman la curva típica de flujo de fallas o también conocida como la curva de la bañera.

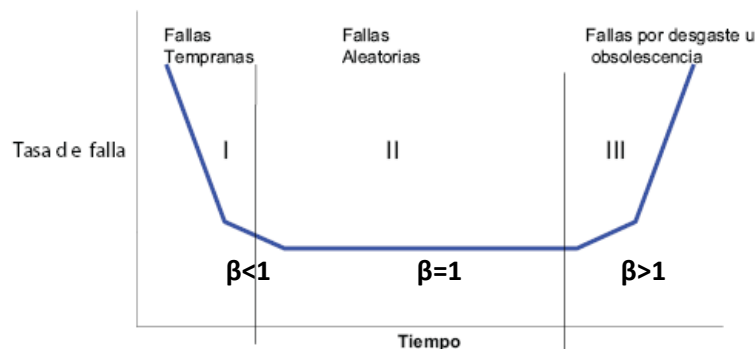


Figura 6. 15. Curva de flujo de fallas o curva de la bañera

Fuente: Autor: Jorge Paredes

En la Figura 6.15, las fallas tempranas, están asociadas con equipos nuevos y pueden ser causadas partes faltantes, falta de capacitación de las personas que instalan el equipo, daño causado a los aparatos o dispositivos, o fallas por defectos de fabricación de las máquinas. La zona II de fallas aleatorias, son inesperadas y pueden surgir por sobrecargas y averías, causadas por factores externos que generan las fallas aún de las piezas mejor construidas; en la curva está representada por una línea horizontal. La zona III, de fallas por desgaste u obsolescencia, son fallas debido a edad, fatiga, corrosión, deterioro mecánico, eléctrico, hidráulico, o por el bajo nivel de mantenimiento y reparación.

Las funciones Weibull de confiabilidad y de tasa de falla propuestas por Waloddi Weibull, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad \text{Ec 6.2}$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad \text{Ec 6.3}$$

Donde:

$R(t)$ – Función de confiabilidad de probabilidad

β – es el parámetro de forma y es el indicador del mecanismo de falla

α – es el parámetro de escala – vida característica

γ – es el parámetro de localización- la vida mínima. Cuando $\gamma = 0$ la ecuación 6.2 queda en función de 2 parámetros.

$F(t)$ – Función de densidad de probabilidad de tasa de falla

Según Shigley ^[18], de diseño en ingeniería mecánica, menciona que el parámetro β (b) controla el sesgo de la distribución, entonces de acuerdo a la Figura 6.16, para β grandes la distribución tiene un sesgo hacia la derecha, mientras que para β pequeñas, se aprecia un sesgo hacia la izquierda. Cuando $\beta = 1$, la distribución es exponencial.

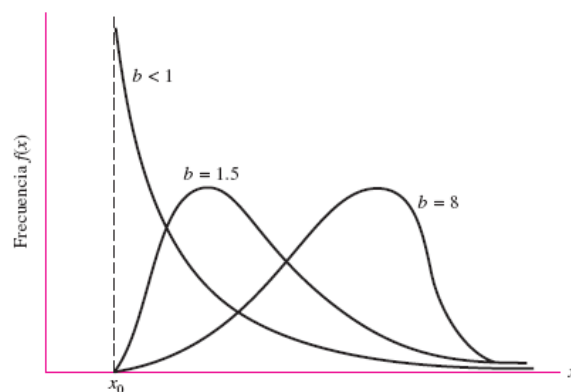


Figura 6. 16. Función de densidad de la distribución de Weibull mostrando el efecto del sesgo del parámetro de forma β

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica, SHIGLEY.

Un cambio en el parámetro de escala (α) tiene el mismo efecto en la distribución que un cambio de escala de la abscisa, esto es, para un mismo valor de β y (γ) en una distribución normal, si (α) se incrementa la distribución se contrae y si (α) disminuye la distribución se expande.

El parámetro de localización (γ) sirve para ubicar el inicio de la distribución a lo largo del eje x.

La distribución de Weibull no sirve cuando no han ocurrido fallas, es decir, sirve para caracterizar el histórico de averías o fallas en componentes, permitiendo la determinación de las probabilidades de fallo y duración media de cada componente.

Para poder graficar la relación confiabilidad – edad, sólo se necesita determinar (cálculo a partir de datos históricos) los valores de los parámetros β y (α). Estos gráficos ayudan a comprender el comportamiento histórico de falla de los componentes y de los modos de falla de interés.

Conociendo los valores de la media aritmética (\bar{x}), la varianza (S^2), la desviación estándar (S), el tiempo de falla de cada evento (t_i) y el número de datos o eventos (n), se pueden determinar los parámetros β y α ; las ecuaciones siguen a continuación:

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(t_i)}{n} \quad \text{Ec 6.4}$$

- Varianza

$$S^2 = \frac{(\sum \ln(t_i) - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad \text{Ec 6.5}$$

- Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec 6.6}$$

- Parámetro β

$$\beta = \frac{\pi}{S \sqrt{6}} \quad \text{Ec 6.7}$$

- Parámetro α

$$\alpha = \exp \left(x + \left(\frac{0.5772}{\beta} \right) \right) \quad \text{Ec 6.8}$$

- $\gamma=0$ cuando no existen datos de falla anterior del elemento

6.7.9.2.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE WEIBULL PARA EL BLINDAJE

Es preciso mencionar que en los registros del Ingenio Azucarero San Juan no existen históricos de falla del virador, pero es un elemento que se lo cambia cada año debido a la degradación del material, en especial en la zona de los dientes (Figura 6.17); debido a esto los tiempos de falla que se utilizaran en el cálculo de la confiabilidad y probabilidad de fallo, serán los que se determinaron de acuerdo a la Tabla 6.3, que indica la vida útil de los flancos de los dientes del virador según el espesor de blindaje que se aplique.

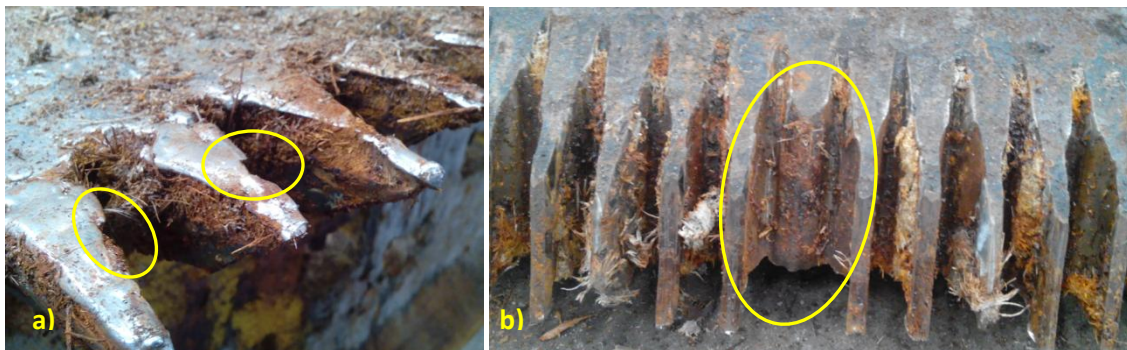


Figura 6. 17. Degradación del material de los dientes del virador después de 120 días de zafra, a) flanco de diente despostillado, b) desprendimiento total del diente

Fuente: Autor: Jorge Paredes

Con la aclaración anterior, en el software de análisis estadístico se procede al cálculo de la media aritmética (\bar{x}), la varianza (S^2), la desviación estándar (S), el parámetro de forma β y el parámetro de escala (α); y según las ecuaciones 6.4 a la 6.8, obteniendo los resultados de la Tabla 6.4.

Tabla 6. 4. Cálculo de variables para determinar la confiabilidad del blindaje

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Media aritmética \bar{x} =	5,107090963
Varianza S^2 =	0,098002163
Desviación estándar S =	0,313052971
Parámetro de forma β =	4,09690994
Parámetro de escala α =	190,1812631
Parámetro de localización γ =	0

Con los datos obtenidos de las Tablas 6.3 y 6.4, y con el software de análisis estadístico se procede a calcular la confiabilidad y la probabilidad de falla de los flancos de los dientes del virador, mediante el uso de las Ecuaciones 6.2 y 6.3; obteniendo los resultados de la Tabla 6.5.

Tabla 6. 5. Valores calculados de la confiabilidad y probabilidad del fallo del blindaje

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Espesor (mm)	Tiempo (días)	Ln(ti)	(Ln(ti)-x) ²	R(t)	F(t)
0,50	98,05	4,58551361	0,27204294	0,42711683	0,57288317
0,60	116,50	4,75788112	0,121947512	0,41178566	0,58821434
0,70	134,99	4,90518996	0,040764013	0,39862470	0,60137530
0,80	153,52	5,03383794	0,005366006	0,38709934	0,61290066
0,90	172,10	5,14805495	0,001678048	0,37685105	0,62314895
1,00	190,72	5,25078225	0,020647186	0,36762760	0,63237240
1,10	209,38	5,34414120	0,056192814	0,35924529	0,64075471
1,20	228,08	5,42971132	0,104083896	0,35156619	0,64843381
1,30	246,83	5,50870631	0,161294888	0,34448352	0,65551648
Σ =		45,96381867	0,78401730		

Los resultados de la Tabla 6.5, han permitido generar las gráficas de distribución de Weibull, para la confiabilidad (Edad vs $R(t)$) y la probabilidad de falla (Edad vs $F(t)$) de los flancos de los dientes del virador de caña.

En la Figura 6.18, se puede representar el punto (A) que establece que para un proceso operativo completo de duración 8 meses (240 días), la confiabilidad del blindaje en los flancos de los dientes del virador, estará en aproximadamente 35%.

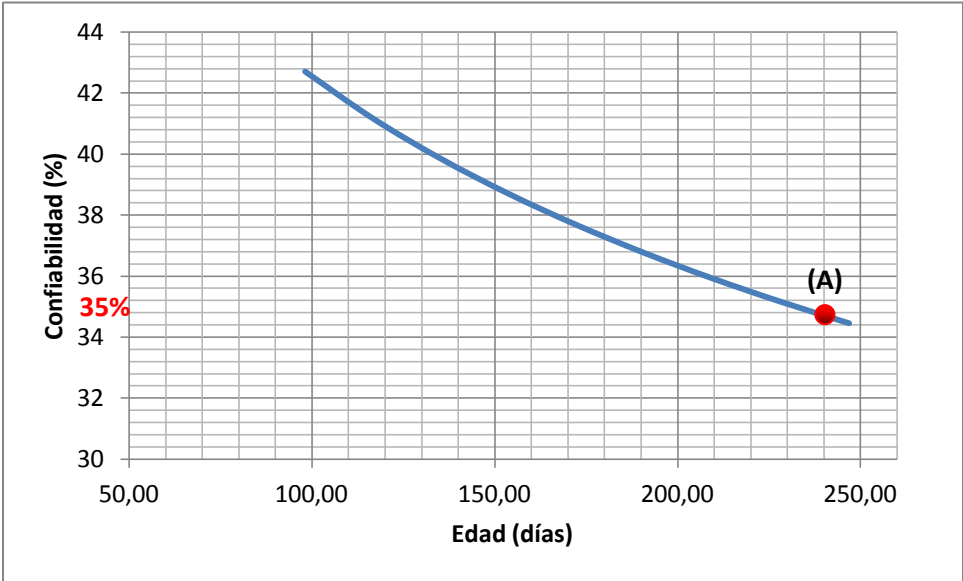


Figura 6. 18. Función de confiabilidad de Weibull para el blindaje
(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

Así mismo, en la Figura 6.19, se puede representar el punto (B), que indica que la probabilidad de falla del blindaje, en los flancos de los dientes del virador de caña al cumplirse los 8 meses del proceso operativo completo (240 días), será aproximadamente del 65%.

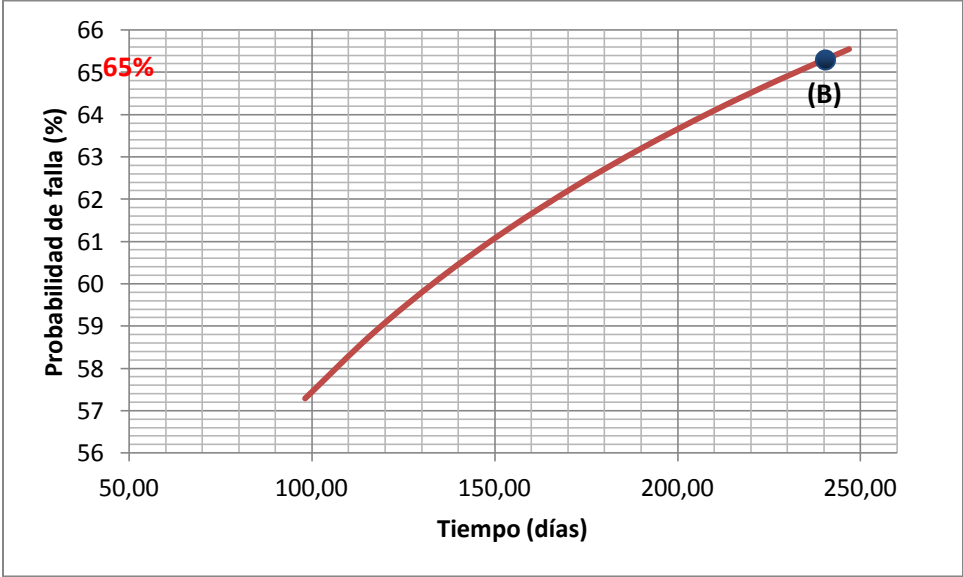


Figura 6. 19. Función de densidad de probabilidad de tasa de falla para el blindaje
(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

6.7.10.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De los resultados se detalla lo siguiente:

- Con el criterio de vida útil relacionado al ensayo de desgaste por abrasión que se realizó en la parte experimental del capítulo 4, y seleccionando el mejor comportamiento que obtuvo el blindaje en cuanto a la menor pérdida de masa y mejor resistencia al desgaste, se ha podido determinar que, con la aplicación de un espesor de blindaje de 1.3mm en los flancos de los dientes del virador, se puede llegar a garantizar que este recubrimiento cumpla el tiempo de zafra completo que es de 8 meses (240 días), tomando en cuenta también que el virador se ubica físicamente dentro del molino, en un lugar inaccesible a cualquier tipo de mantenimiento que se lo desee realizar, en los paros por mantenimiento programados cada 15 a 18 días.
- En el análisis de confiabilidad del blindaje de los flancos de los dientes del virador mediante el uso de la distribución de Weibull, se ha podido determinar que el blindaje puede finalizar el tiempo de zafra de 8 meses (240 días), pero estaría con una confiabilidad de operación del 35%. Y quizá es precisamente lo que se desea conseguir, que el blindaje haga el papel de esclavo de sacrificio, y que se desgaste al máximo, con la finalidad de que al terminar la zafra, se vuelvan a blindar los flancos de los dientes para la siguiente temporada de operaciones y así evitar el desgaste del material “madre” ó la adquisición de nuevos viradores.
- En términos de la probabilidad de falla del blindaje, es complementario a lo antes descrito, ya que el blindaje de los flancos de los dientes del virador al llegar a los 240 días de trabajo (8 meses), su probabilidad de falla estará en aproximadamente el 65%. Ubicándonos en la curva de la bañera de la Figura 6.15, estamos dentro de la zona III de fallas por desgaste u obsolescencia, debido también a que el valor calculado del parámetro de forma resulta ser $\beta > 1$; pero se debe aclarar que en esta zona III, se habla del blindaje o recubrimiento que se realizó a los flancos de los dientes, más no al

virador, ya que éste debería estar protegido con el esclavo de sacrificio al desgaste que es la aleación micropulverizada Eutalloy 11496.

6.8.- ADMINISTRACIÓN

A continuación se detallan los gastos económicos que hicieron posible la realización del presente análisis, se incluye gastos materiales, ensayos en laboratorios y de logística.

Tabla 6. 6. Descripción de gastos para la investigación.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	UNID	\$ UNITARIO	\$ TOTAL
MATERIALES					
1	Oxígeno industrial	10	m3	2,25	22,50
2	Acetileno	36	kg	16,80	604,80
3	Aleación micropulverizada Eutalloy 11496	2,5	kg	200,00	500,00
4	Sierra de corte	2	u	3,00	6,00
5	Discos abrasivos de grano de circonio 120	2	u	7,50	15,00
				TOTAL 1	1148,30
SERVICIOS					
6	Ensayo cámara de niebla salina EPN	1	u	403,20	403,20
7	Ensayo desgaste abrasión (Laboratorios UTA)	1	u	0,00	0,00
8	Ensayo metalográfico (Laboratorios UTA)	1	u	0,00	0,00
9	Imágenes SEM (Laboratorios UTA)	1	u	0,00	0,00
10	Corte de probetas en sierra vaivén (Ingenio San Juan)	1	u	0,00	0,00
11	Proyección térmica (Ingenio San Juan)	1	u	0,00	0,00
12	Ensayo de humedad (Ingenio San Juan)	1	u	0,00	0,00
13	Ensayo de granulometría (Ingenio San Juan)	1	u	0,00	0,00
14	Ensayo de dureza, espesor, rugosidad (Ingenio San Juan)	1	u	0,00	0,00
15	Sandblasting y Gritblasting	1	u	110,00	110,00
				TOTAL 2	513,20
VARIOS					
16	Materiales de oficina	1	u	50,00	50,00
17	Internet	1	u	30,00	30,00
18	Transporte	1	u	30,00	30,00
19	Impresiones, anillados, copias	1	u	80,00	80,00
				TOTAL 3	190,00
				GRAN TOTAL	1851,50

6.9.- PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

De acuerdo a la presente investigación se ha podido determinar que realizando el blindaje del acero AISI 1045 en los flancos de los dientes del virador del molino caña, mediante el uso de la aleación micropulverizada Eutalloy 11496, con preparación superficial tipo sandblasting para obtener una rugosidad de 4.5 mils del tipo NACE No. 1/SSPC-SP 5, con temperaturas de precalentamiento de la superficie entre 320 y 420°C, y con espesores de blindaje hasta 1.3mm; los resultados son favorables a la resistencia al desgaste abrasivo, al obtener las más bajas tasas de pérdida de material base, y favorables también a la resistencia a la corrosión por efecto de que el blindaje debido a sus componentes aleantes como son el cromo y níquel, se vuelven como esclavos de sacrificio ante el medio agresivo salino corrosivo. La confiabilidad del blindaje llega hasta aproximadamente el 35% transcurridos los 240 días de zafra y la probabilidad de falla del blindaje a ese tiempo es de aproximadamente el 65%.

Todo lo anterior descrito es un aporte a los campos de la ingeniería en lo que a procesos de manufactura, materiales y deposición de metales se refiere. Específicamente se aporta al área de molinos de los ingenios azucareros, en los cuales los factores de desgaste abrasivo y corrosivo son agresivos e inician los procesos de degradación del material en los elementos del molino de caña.

7.- BIBLIOGRAFÍA

[1] ALVAREZ J., Modelado del tren de molinos de un Ingenio Azucarero, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2001.

[2] REIN Peter, Cane Sugar Engineering, Berlín, Alemania, Elbe Druckerei Wittenberg, 2007.

[3] HUGOT E., Manual para Ingenieros Azucareros. México, CIA. Editorial Continental, 2007.

[4] AVNER S., Introducción a la metalurgia física. U.S.A., Segunda Edición, McGraw-Hill, 2000.

[5] GUTIERREZ W., Resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos producidos por proyección térmica para aplicaciones navales, Universidad de Colombia, Bogotá, Colombia, 2004.

[6] DAVIS J., Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance. U.S.A., First printing. ASM International, 2001.

[7] GONZÁLEZ A., Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno, Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia, 2008.

[8] CALLISTER W., Ciencia e ingeniería de los materiales, Barcelona, España, Editorial Reverté.

[9] ASTM G-65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, 2000.

- [10] SMITH W., Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, España, Tercera edición, McGraw-Hill, 1998.
- [11] ASTM B-117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, 2003.
- [12] ASTM E-11: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.
- [13] ASTM G1: Standard Practice for Preparing Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, 1999.
- [14] ASTM E-112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 1996.
- [15] NACE INTERNATIONAL: Standard RP0287-2002, Field Measurement of Surface Profile of Abrasive Blast-Cleaned Steel Surfaces Using a Replica Tape, 2002.
- [16] KRAGELSKY V. Friction Wear Lubrication, Moscow, Mir Publishers.
- [17] ABERNETHY R., Weibull Analysis Handbook, Florida, U.S.A., 1933.
- [18] BUDYNAS R., Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, México, 8va edición, McGraw-Hill, 2008.
- [19] ASM International Metals Handbook, Volume 4 / Volume 9, 1991.
- [20] CALLISTER W., Materials Science and Engineering, U.S.A., 7th ed. John Wiley & Sons. Inc, 2007.
- [21] ASM International Metals Handbook, Friction Lubrication and Wear Technology, Volume 18, 1992.

ANEXOS

ANEXO A: NORMAS

ANEXO A1

ESTRACTO DE LA NORMA ASTM G-65



Designation: G 65 – 00^{ε1}

Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation G 65; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

^{ε1} Note—The designation year date was corrected editorially in May 2001.

1. Scope

1.1 This test method covers laboratory procedures for determining the resistance of metallic materials to scratching abrasion by means of the dry sand/rubber wheel test. It is the intent of this test method to produce data that will reproducibly rank materials in their resistance to scratching abrasion under a specified set of conditions.

1.2 Abrasion test results are reported as volume loss in cubic millimetres for the particular test procedure specified. Materials of higher abrasion resistance will have a lower volume loss.

NOTE 1—In order to attain uniformity among laboratories, it is the intent of this test method to require that volume loss due to abrasion be reported only in the metric system as cubic millimetres. $1 \text{ mm}^3 = 6.102 \times 10^{-5} \text{ in}^3$.

1.3 This test method covers five recommended procedures which are appropriate for specific degrees of wear resistance or thicknesses of the test material.

1.3.1 *Procedure A*—This is a relatively severe test which will rank metallic materials on a wide volume loss scale from low to extreme abrasion resistance. It is particularly useful in ranking materials of medium to extreme abrasion resistance.

1.3.2 *Procedure B*—A short-term variation of Procedure A. It may be used for highly abrasive resistant materials but is particularly useful in the ranking of medium- and low-abrasive-resistant materials. Procedure B should be used when the volume-loss values developed by Procedure A exceeds 100 mm^3 .

1.3.3 *Procedure C*—A short-term variation of Procedure A for use on thin coatings.

1.3.4 *Procedure D*—This is a lighter load variation of Procedure A which is particularly useful in ranking materials of low-abrasion resistance. It is also used in ranking materials of a specific generic type or materials which would be very close in the volume loss rates as developed by Procedure A.

1.3.5 *Procedure E*—A short-term variation of Procedure B that is useful in the ranking of materials with medium- or

low-abrasion resistance.

1.4 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 2240 Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness²

E 11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes³

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process³

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods³

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion⁴

2.2 American Foundrymen's Society Standards:

AFS Foundry Sand Handbook, 7th Edition⁵

3. Terminology

3.1 Definition:

3.1.1 *abrasive wear*—wear due to hard particles or hard protuberances forced against and moving along a solid surface (Terminology G 40).

NOTE 2—This definition covers several different wear modes or mechanisms that fall under the abrasive wear category. These modes may degrade a surface by scratching, cutting, deformation, or gouging (1 and 6).⁶

4. Summary of Test Method

4.1 The dry sand/rubber wheel abrasion test (Fig. 1) involves the abrading of a standard test specimen with a grit of controlled size and composition. The abrasive is introduced

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

⁵ Available from American Foundrymen's Society, Golf and Wolf Roads, Des Plaines, IL 60016.

⁶ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.30 on Abrasive Wear.

Current edition approved Oct. 10, 2000. Published November 2000. Originally published as G 65 – 80. Last previous edition G 65 – 94 (2000)^{ε1}.

(Fuente: ASTM G-65)

ANEXO A1 (Continuación)

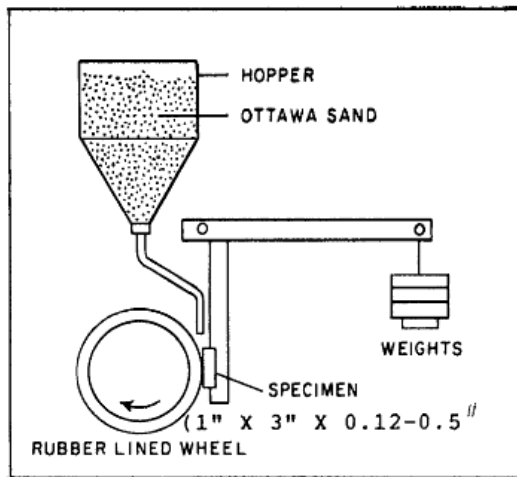


FIG. 1 Schematic Diagram of Test Apparatus

between the test specimen and a rotating wheel with a chlorobutyl rubber tire or rim of a specified hardness. This test specimen is pressed against the rotating wheel at a specified force by means of a lever arm while a controlled flow of grit abrades the test surface. The rotation of the wheel is such that its contact face moves in the direction of the sand flow. Note that the pivot axis of the lever arm lies within a plane which is approximately tangent to the rubber wheel surface, and normal to the horizontal diameter along which the load is applied. The test duration and force applied by the lever arm is varied as noted in Procedure A through E. Specimens are weighed before and after the test and the loss in mass recorded. It is necessary to convert the mass loss to volume loss in cubic millimetres, due to the wide differences in the density of materials. Abrasion is reported as volume loss per specified procedure.

5. Significance and Use (1-7)

5.1 The severity of abrasive wear in any system will depend upon the abrasive particle size, shape, and hardness, the magnitude of the stress imposed by the particle, and the frequency of contact of the abrasive particle. In this practice these conditions are standardized to develop a uniform condition of wear which has been referred to as scratching abrasion (1 and 2). The value of the practice lies in predicting the relative ranking of various materials of construction in an abrasive environment. Since the practice does not attempt to duplicate all of the process conditions (abrasive size, shape, pressure, impact, or corrosive elements), it should not be used to predict the exact resistance of a given material in a specific environment. Its value lies in predicting the ranking of materials in a similar relative order of merit as would occur in an abrasive environment. Volume loss data obtained from test materials whose lives are unknown in a specific abrasive environment may, however, be compared with test data obtained from a material whose life is known in the same environment. The comparison will provide a general indication

of the worth of the unknown materials if abrasion is the predominant factor causing deterioration of the materials.

6. Apparatus and Material⁷

6.1 Fig. 2 shows a typical design and Fig. 3 and Fig. 4 are photographs of the test apparatus which may be constructed from readily available materials. Also, see Ref (2). Several elements are of critical importance to ensure uniformity in test results among laboratories. These are the type of rubber used on the wheel, the type of abrasive and the shape, positioning and the size opening of the sand nozzle, and a suitable lever arm system to apply the required force.

6.2 *Rubber Wheel*—The wheel shown in Fig. 5 shall consist of a steel disk with an outer layer of chlorobutyl rubber molded to its periphery. Uncured rubber shall be bonded to the rim and fully cured in a steel mold. The optimum hardness of the cured rubber is Durometer A-60. A range from A58 to 62 is acceptable. At least four hardness readings shall be taken on the rubber approximately 90° apart around the periphery of the wheel using a Shore A Durometer tester in accordance with Test Method D 2240. The gage readings shall be taken after a dwell time of 5 s. The recommended composition of the rubber and a qualified molding source is noted in Table 1. (See 9.9 for preparation and care of the rubber wheel before and after use and see Fig. 2 and Fig. 5.)

6.3 *Abrasive*—The type of abrasive shall be a rounded quartz grain sand as typified by AFS 50/70 Test Sand (Fig. 6).⁸ The moisture content shall not exceed 0.5 weight %. Sand that has been subjected to dampness or to continued high relative humidity may take on moisture, which will affect test results. Moisture content may be determined by measuring the weight loss after heating a sample to approximately 120°C (250°F) for 1 h minimum. If test sand contains moisture in excess of 0.5 % it shall be dried by heating to 100°C (212°F) for 1 h minimum and the moisture test repeated. In high-humidity areas sand may be effectively stored in constant temperature and humidity rooms or in an enclosed steel storage bin equipped with a 100-W electric bulb. Welding electrode drying ovens, available from welding equipment suppliers are also suitable. Multiple use of the sand may affect test results and is not recommended. AFS 50-70 Test Sand is controlled to the following size range using U.S. sieves (Specification E 11).

U.S. Sieve Size	Sieve Opening	% Retained on Sieve
40	425 μm (0.0166 in.)	none
50	300 μm (0.0117 in.)	5 max
70	212 μm (0.0083 in.)	95 min
100	150 μm (0.0059 in.)	none passing

6.4 *Sand Nozzle*—Fig. 7 shows the fabricated nozzle design which was developed to produce an accurate sand flow rate and proper shape of sand curtain for test procedures. The nozzle may be of any convenient length that will allow for connection to the sand hopper using plastic tubing. In new nozzles, the rate of sand flow is adjusted by grinding the orifice of the nozzle to

⁷ Original users of this test method fabricated their own apparatus. Machines are available commercially from several manufacturers of abrasion testing equipment.

⁸ Available from U.S. Silica Co., P.O. Box 577, Ottawa, IL 61350. Sand from other sources was not used in the development of this test method and may give different results.

ANEXO A1 (Continuación)

ASTM G 65

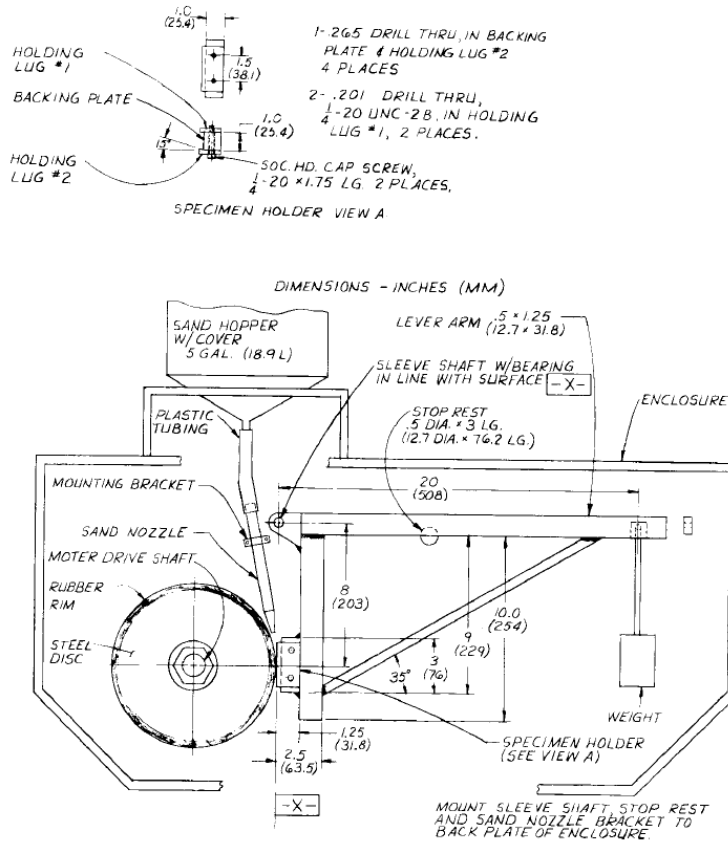


FIG. 2 Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test Apparatus

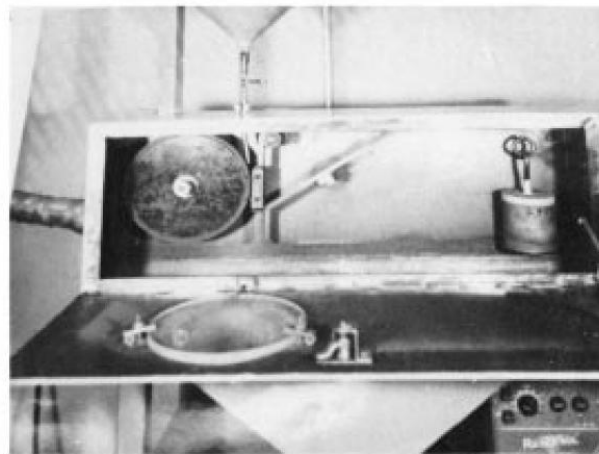


FIG. 3 Wheel and Lever Arm

increase the width of the opening to develop a sand flow rate of 300 to 400 g/min. During use, the nozzle opening must be

positioned as close to the junction of the test specimen and the rubber wheel as the design will allow. (See Fig. 8.)

ANEXO A1 (Continuación)

ASME G 65

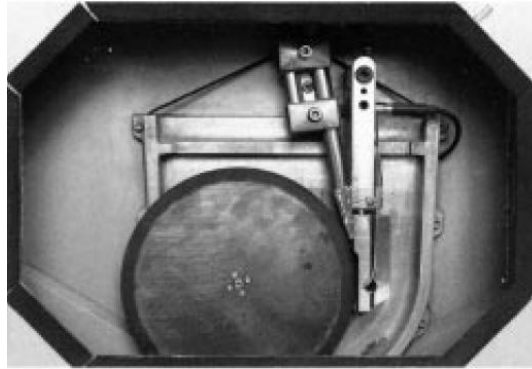


FIG. 4 Enclosure Frame

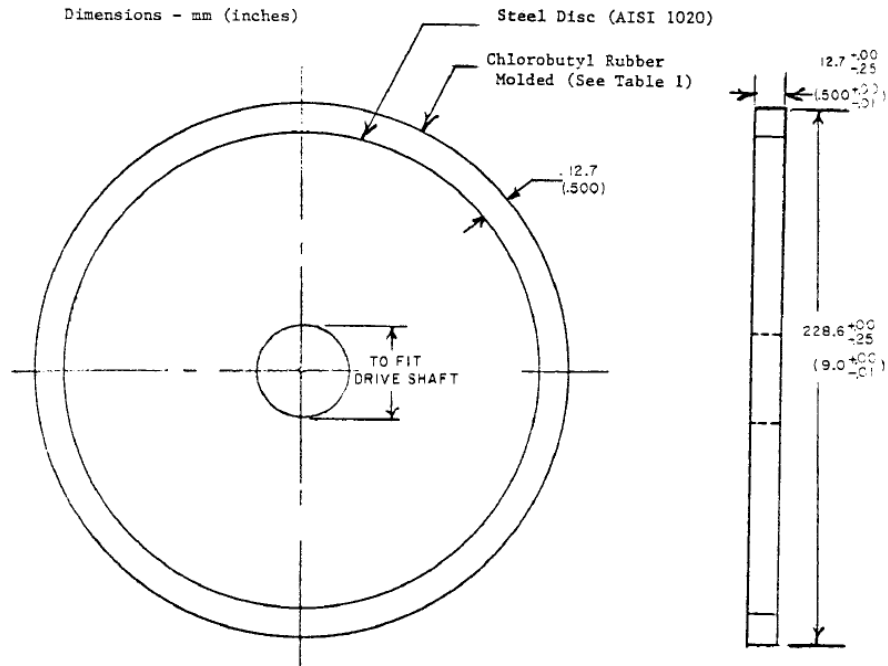


FIG. 5 Rubber Wheel

6.4.1 Any convenient material of construction that is available as welded or seamless pipe may be used for the construction of the fabricated nozzle. Stainless steel is preferred because of its corrosion resistance and ease of welding. Copper and steel are also used successfully.

6.4.2 *Formed Nozzle*—Nozzles formed from tubing may be used only when they duplicate the size and shape (rectangular orifice and taper), and the sand flow characteristics (flow rate and streamlined flow) of the fabricated nozzle. (See Fig. 7 and Fig. 9.)

6.4.3 *Sand Flow*—The nozzle must produce a sand flow rate of 300 to 400 g/min (0.66 to 0.88 lb/min).

6.4.4 *Sand Curtain*—Fig. 9 shows the proper stream-lined flow and the narrow shape of the sand curtain as it exits from

the sand nozzle. A turbulent sand flow as depicted in Fig. 10 will tend to produce low and inconsistent test results. It is intended that the sand flows in a streamlined manner and passes between the specimen and rubber wheel.

6.5 *Motor Drive*—The wheel is driven by a nominally 0.7-kW (1-hp) d-c motor through a 10/1 gear box to ensure that full torque is delivered during the test. The rate of revolution (200 ± 10 rpm) must remain constant under load. Other drives producing 200 rpm under load are suitable.

6.6 *Wheel Revolution Counter*—The machine shall be equipped with a revolution counter that will monitor the number of wheel revolutions as specified in the procedure (Section 9). It is recommended that the incremental counter have the ability to shut off the machine after a preselected

ANEXO A1 (Continuación)

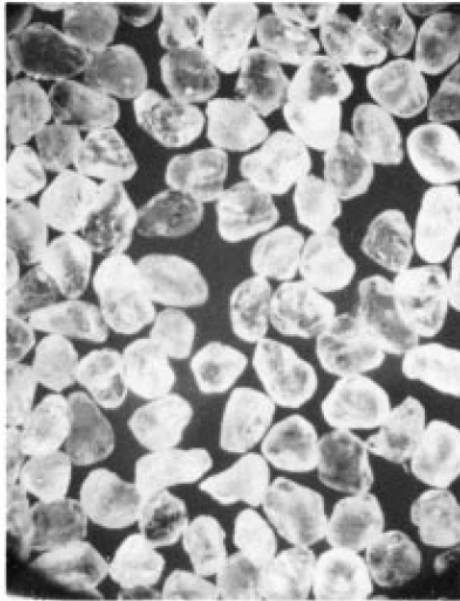
65

TABLE 1 Formula for Chlorobutyl Rubber^A

NOTE 1—Specific gravity of mix: 1.15. Pressure cure: 20 min at 160°C (320°F).

Materials	Proportions by Weight
Chlorobutyl No. HT 10-66 (Enjay Chemical)	100
Agerite Staylite-S	1
HAF black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

^A The sole source of supply known to the committee at this time is Action Rubber Co., Inc., 601 Fame Rd., Dayton, OH 45449. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.



number of wheel revolutions or increments up to 12 000 revolutions is attained.

6.7 *Specimen Holder and Lever Arm*— The specimen holder is attached to the lever arm to which weights are added, so that a force is applied along the horizontal diametral line of the wheel. An appropriate number of weights must be available to apply the appropriate force (Table 2) between the test specimen and the wheel. The actual weight required should not be calculated, but rather should be determined by direct measurement by noting the load required to pull the specimen holder away from the wheel. A convenient weight system is a can filled with sand (see Fig. 2).

6.8 *Analytical Balance*—The balance used to measure the loss in mass of the test specimen shall have a sensitivity of 0.001 g. Procedure C requires a sensitivity of 0.0001 g.

6.9 *Enclosure, Frame, and Abrasive Hopper*—Fig. 3 and

Fig. 4 are photographs of a typical test apparatus. The size and shape of the support elements, enclosure, and hopper may be varied according to the user's needs.

7. Specimen Preparation and Sampling

7.1 *Materials*—It is the intent of this test method to allow for the abrasion testing of any material form, including wrought metals, castings, forgings, gas or electric weld overlays, plasma spray deposits, powder metals, metallizing, electroplated, cermets, ceramics etc. The type of material will, to some extent, determine the overall size of the test specimen.

7.2 *Typical Specimen*, a rectangular shape 25 by 76 mm (1.0 by 3.0 in.) and between 3.2 and 12.7 mm (0.12 and 0.50 in.) thick. The size may be varied according to the user's need with the restriction that the length and width be sufficient to show the full length of the wear scar as developed by the test. The test surface should be flat within 0.125 mm (0.005 in.) maximum.

7.3 *Wrought, Cast, and Forged Metal*— Specimens may be machined to size directly from the raw material.

7.4 *Electric or Gas Weld Deposits* are applied to one flat surface of the test piece. Double-weld passes are recommended to prevent weld dilution by the base metal. The heat of welding may distort the test specimen. When this occurs, the specimen may be mechanically straightened or ground, or both. In order to develop a suitable wear scar, the surface to be abraded must be ground flat to produce a smooth, level surface at least 63.4 mm (2.50 in.) long and 19.1 mm (0.75 in.) for the test. (See 7.5.) Note that the welder technique, heat input of welds, and the flame adjustment of gas welds will have an effect on the abrasion resistance of a weld deposit.

7.5 *Finish*—Test specimens should be smooth, flat, and free of scale. Surface defects such as porosity and roughness may bias the test results, and such specimens should be avoided unless the surface itself is under investigation. Typical suitable surfaces are mill-rolled surfaces such as are present on cold-rolled steel, electroplated and similar deposits, ground surfaces, and finely machined or milled surfaces. A ground surface finish of approximately 0.8 μm (32 $\mu\text{in.}$) or less is acceptable. The type of surface or surface preparation shall be stated in the data sheet.

8. Test Parameters

8.1 Table 2 indicates the force applied against the test specimen and the number of wheel revolutions for test Procedures A through E.

8.2 *Sand Flow*—The rate of sand flow shall be 300 to 400 g/min (0.66 to 0.88 lb/min).

8.3 *Time*—The time of the test will be about 30 min for Procedures A and D, 10 min for Procedure B, 5 min for Procedure E, and 30 s for Procedure C, depending upon the actual wheel speed. In all cases the number of wheel revolutions and not the time shall be the controlling parameter.

8.4 *Lineal Abrasion*—Table 2 shows the lineal distance of scratching abrasion developed using a 228.6-mm (9-in.) diameter wheel rotating at the specified number of revolutions. As the rubber wheel reduces in diameter the number of wheel revolutions shall be adjusted to equal the sliding distance of a new wheel (Table 2) or the reduced abrasion rate shall be taken

ANEXO A1 (Continuación)

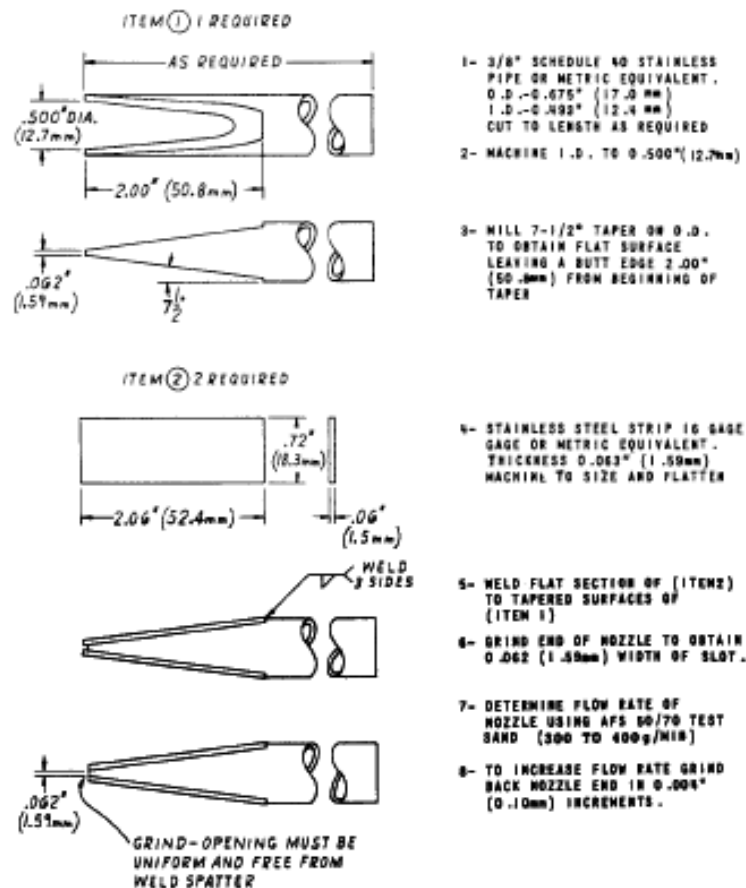


FIG. 7 Sand Nozzle

into account by adjusting the volume loss produced by the worn wheel to the normalized volume loss of a new wheel. (See 10.2.)

9. Procedure

9.1 *Cleaning*—Immediately prior to weighing, clean the specimen with a solvent or cleaner and dry. Take care to remove all dirt or foreign matter or both from the specimen. Dry materials with open grains (some powder metals or ceramics) to remove all traces of the cleaning solvent, which may have been entrapped in the material. Steel specimens having residual magnetism should be demagnetized or not used.

9.2 Weigh the specimen to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.3 Seat the specimen securely in the holder and add the proper weights to the lever arm to develop the proper force pressing the specimen against the wheel. This may be measured accurately by means of a spring scale which is hooked around the specimen and pulled back to lift the specimen away

from the wheel. A wedge should be placed under the lever arm so that the specimen is held away from the wheel prior to start of test. (See Fig. 2.)

9.4 Set the revolution counter to the prescribed number of wheel revolutions.

9.5 *Sand Flow and Sand Curtain*—The rate of sand flow through the nozzles shall be between 300 g (0.66 lb)/min and 400 g (0.88 lb)/min. Do not start the wheel rotation until the proper uniform curtain of sand has been established (see Fig. 9 and Note 3).

9.5.1 The dwell time between tests shall be the time required for the temperature of the rubber wheel to return to room temperature. For Procedure B the dwell time shall be at least 30 min.

9.6 Start the wheel rotation and immediately lower the lever arm carefully to allow the specimen to contact the wheel.

9.7 When the test has run the desired number of wheel revolutions, lift the specimen away from the wheel and stop the sand flow and wheel rotation. The sand flow rate should be

ANEXO A1 (Continuación)



FIG. 8 Position of Sand Nozzle

measured before and after a test, unless a consistent flow rate has been established.

9.8 Remove the specimen and reweigh to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.8.1 *Wear Scar*—Observe the wear scar and compare it to the photographs of uniform and nonuniform wear scars in Fig. 11. A nonuniform pattern indicates improper alignment of the rubber rim to the test specimen or an unevenly worn rubber wheel. This condition may reduce the accuracy of the test.

9.9 *Preparation and Care of Rubber Wheels*—Dress the periphery of all new rubber wheels and make concentric to the bore of the steel disk upon which the rubber is mounted. The concentricity of the rim shall be within 0.05 mm (0.002 in.) total indicator reading on the diameter. Follow the same dressing procedure on used wheels that develop grooves or that wear unevenly so as to develop trapezoidal or uneven wear scars on the test specimen (Fig. 11). The intent is to produce a uniform surface that will run tangent to the test specimen without causing vibration or hopping of the lever arm. The wear scars shall be rectangular in shape and of uniform depth at any section across the width. The rubber wheel may be used until the diameter wears to 215.9 mm (8.50 in.). New rubber rims may be mounted on steel disks by the qualified source (6.2).

9.10 *Wheel Dressing Procedure*—The preferred dressing procedure for the periphery of the rubber rim is to mount a

diamond-cut file⁹ in place of the specimen in the holder and run the machine with load until the wheel is clean. Another dressing procedure for the periphery of the rubber rim is to mount the wheel on a lathe, and machine the surface with a tool bit especially ground for rubber applications. Grind a carbide or high-speed steel tool bit to very deep rake angles (Fig. 12). Feed the tool across the rubber surface in the opposite direction from that normally used for machining steel. This allows the angular surface of the tool bit to shear away thin layers of rubber without tearing or forming grooves in the rubber as would occur when using the pointed edges of the tool. The recommended machining parameters are: *Feed*—25 mm/min (1.0 in./min); *Speed*—200 rpm; *Depth of Cut*—0.254 mm (0.010 in.) to 0.762 mm (0.030 in.). The dressed wheel should be first used on a soft carbon steel test specimen (AISI 1020 or equivalent) using Procedure A. This results in a smooth, uniform, non-sticky surface. An alternative dressing method involves the use of a high-speed grinder on the tool post of a lathe. Take great care since grinding often tends to overheat and smear the rubber, leaving a sticky surface. Such a surface will pick up and hold sand particles during testing. If the grinding method is used, not more than 0.05 mm (0.002 in.) may be ground from the surface at one time so as to prevent overheating.

10. Calculating and Reporting Results

10.1 The abrasion test results should be reported as volume loss in cubic millimetres in accordance with the specified procedure used in the test. For example, ___ mm³ per ASTM ___ Procedure ___. While mass loss results may be used internally in test laboratories to compare materials of equivalent densities, it is essential that all users of this test procedure report their results uniformly as volume loss in publications or reports so that there is no confusion caused by variations in density. Convert mass loss to volume loss as follows:

$$\text{Volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss (g)}}{\text{density (g/cm}^3\text{)}} \times 1000 \quad (1)$$

10.2 *Adjusting the Volume Loss*—As the rubber wheel decreases in diameter the amount of scratching abrasion developed in a given practice will be reduced accordingly. The actual volume loss produced by these slightly smaller wheels will, therefore, be inaccurate. The “adjusted volume loss” value takes this into account and indicates the actual abrasion rate that would be produced by a 228.6-mm (9.00-in.) diameter wheel. Calculate the adjusted volume loss (AVL) as follows:

$$\text{AVL} = \text{measured volume loss} \times \frac{228.6 \text{ mm (9.00 in.)}}{\text{wheel diameter after use}} \quad (2)$$

10.3 *Reporting Test Results*—All significant test parameters and test data as noted in Tables 2 and 3 shall be reported. Any variation from the recommended procedure must be noted in the comments. The report shall include a statement of the current precision and accuracy of the test apparatus as qualified

⁹ The sole source of supply known to the committee at this time is Falex Corp., 1020 Airpark Dr., Sugar Grove, IL 60554. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the reasonable technical committee, which

ANEXO A1 (Continuación)

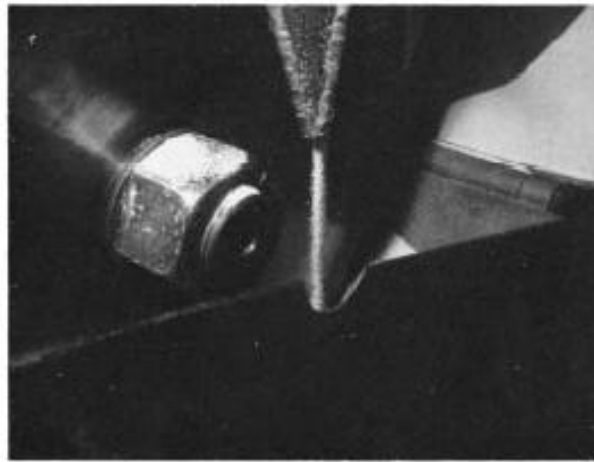


FIG. 9 Sand Flow—Streamlined



FIG. 10 Sand Flow—Turbulence

TABLE 2 Test Parameters

Specified Procedure	Force Against Specimen, ^a N (lb)	Wheel Revolutions	Linear Abrasion ^b m (ft)
A	130 (30)	6000	4309 (14 138)
B	130 (30)	2000	1436 (4 711)
C	130 (30)	100	71.8 (235)
D	45 (10.1)	6000	4309 (14 138)
E	130 (30)	1000	718 (2 360)

^a See 8.4.

N = Newton (SI metric term for force)

1 lbf = 4.44822 N

1 Kgf = 9.806650 N

^b Force tolerance is $\pm 3\%$.

by the testing of Reference Materials (11.6). The volume loss data developed by the initial qualification tests (11.4) or the volume loss data developed by the periodic re-qualification tests (11.4.3) should be listed on the data sheet (Table 3).

11. Precision and Bias

11.1 The precision and bias of the measurements obtained with this test method will depend upon strict adherence to the stated test parameters and maintenance of the proper sand flow rate and sand curtain throughout the duration of the test.

11.2 The degree of agreement in repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and close observation of the test by a competent machine operator.

11.3 Normal variations in the abrasive, rubber wheel characteristics, and procedure will tend to reduce the accuracy of this test method as compared to the accuracy of such material property tests as hardness or density.

11.4 *Initial Machine Operation and Qualification*—The number of tests to establish precision and bias of the apparatus

ANEXO A1 (Continuación)

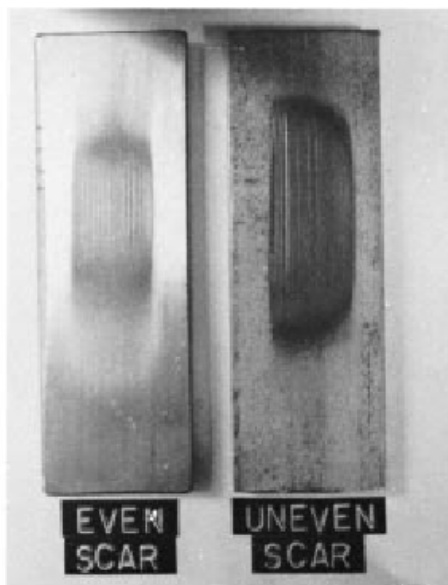


FIG. 11 Typical Wear Scars Uneven and Nonuniform Wear Scars Indicate Improper Alignment or Wear of Rubber Wheel

for initial machine operation shall be at least five. After initial qualification, a minimum of three tests may be used to periodically monitor precision and bias. These tests shall be made using Reference Materials (11.6) and the statistical calculations made, using formulas described in Practice E 122.

11.4.1 Tables X1.1 and X1.2 show representative coefficients of variation or standard deviations, or both, which were obtained in the interlaboratory tests. The coefficient of variation or the standard deviation, or both, for reference materials shall not exceed the values reported. If this value is exceeded, the machine operation shall be considered out of control and steps taken to eliminate erratic results.

11.4.2 The coefficient of variation tends to be higher for materials with volume losses in the range from 1 to 5 mm³. In such cases, the coefficient of variation is about 20 %.

11.4.3 In any test series all data must be considered in the calculation including outliers (data exceeding the obvious range). For example, an exceedingly high- or low-volume loss must not be disregarded except in the case of observed faulty machine operation.

11.4.4 *Re-Qualification of Apparatus*— After the test apparatus has been initially qualified, it is required that one or more standard reference materials be periodically tested to ensure the accuracy of the data generated by the apparatus. This is particularly necessary when new test operators are involved or when the apparatus is not used on a regular basis. Re-qualification is also required for interlaboratory testing and for the qualification of materials as specified in customer and vendor contracts.

11.5 While two or more laboratories may develop test data that is within the acceptable coefficient of variation for their

own individual test apparatus, their actual averages may be relatively far apart. The selection of sample size and the method for establishing the significance of the difference in averages shall be agreed upon between laboratories and shall be based on established statistical methods in Practices E 122, E 177, and Manual MNL 7.¹⁰

11.6 *Reference Materials*—Reference materials¹¹ may be used for periodic monitoring of the test apparatus and procedures in individual laboratories.

11.6.1 While any of the four test procedures (Table 2) may be used on reference materials, it is recommended that Procedure A be used for the more abrasion-resistant materials such as AISI D-2 Tool Steel. When Procedure A volume loss values exceed 100 mm³ in materials such as annealed low-carbon steel, greater accuracy in material ranking can be obtained by using Procedures B or D.

11.6.2 *Three Types of Reference Materials:*

11.6.2.1 *AISI D-2 Tool Steel (Nonfree-Machining Type)*— This is Reference Material No. 1 for Procedure A.¹²

(a) Harden 1010°C (1850°F)—25 min at temperature.

(b) Air cool to room temperature.

(c) Temper at 205°C (400°F)—1 h at temperature.

(d) Air Cool Hardness 59–60 HRC.

(e) Procedure A, qualifying volume loss range—36 ± 5 mm³.

11.6.2.2 *AISI H-13 Tool Steel*—This is Reference Material No. 2 for Procedure B.¹³

(a) Harden 1010/1024°C (1850/1875°F) in neutral salt bath 25 min at temperature.

(b) Air cool to room temperature.

(c) Double temper at 593°C (1100°F) for 2 h and 2 h. Air cool between tempts. Hardness 47–48 HRC.

(d) Procedure B, qualifying volume loss range—56 ± 4 mm³.

11.6.2.3 *AISI 4340 Steel*—This is Reference Material No. 3 for Procedures B or E.

(a) Normalizing heat treatment.

(b) Hardness 31–33 HRC.

(c) Procedure E, qualifying volume loss range—49 ± 3 mm³.

(d) Procedure B, qualifying volume loss range—91 ± 5 mm³.

11.6.3 Volume loss values for reference materials are developed in interlaboratory testing by the Abrasive Wear Task Group of ASTM Subcommittee G02.30.¹⁴ (See X1.3 for typical volume loss values of other materials.) It is the intent of Subcommittee G02.30 to develop several reference materials for abrasive wear testing.

¹⁰ Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis, ASTM MNL 7, ASTM.

¹¹ Contact the Office of Standard Reference Materials, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, or ASTM Headquarters.

¹² For information on D02 Tool Steel, Standard Reference Material No. 1857, contact the Office of Standard Reference Materials, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

¹³ For information on H-13 Tool Steel and 4340 steel contact ASTM Headquarters, Subcommittee G02.30. A qualified source for test specimen is 1020 Airpark Dr., Sugar Grove, IL 60554.

¹⁴ Supporting data available from ASTM Headquarters. Request RR: G02-1006.

ANEXO A1 (Continuación)

who were faced with the problem of evaluating hard surfacing alloys, castings, and wrought products for their resistance to abrasive wear. Individual laboratories set their own test parameters with the goal being the generation of reproducible test data within the laboratory. As the need for standardization became apparent, Subcommittee G02.30 formed a task group to study the effect of each test parameter on the overall results within individual laboratories and among all laboratories as a group. While standardization of test parameters was attained, it became evident that the variability or experimental error inherent in each laboratory was a factor that must be considered. Not only must the test method, apparatus, and individual operator generate repeatable results, but the test results must be consistently reproducible within an acceptable range. Another important consideration in establishing repeatable and reproducible test results was the selection of an adequate sample size. More specifically this was the need for laboratories to agree on the number of times a test should be repeated on a given homogeneous material in order to obtain a meaningful average result. While single test results and simple arithmetic averaging may in some few cases be useful in individual laboratories, it is essential that statistical techniques and multiple testing of specimens be utilized for the qualification of each test apparatus, and for the comparison of materials. Further information on statistical methods may be found in Practice E 122, MNL 7, and in the references.

X1.2 Statistical Equations

X1.2.1 Several equations for the calculation of standard deviation and coefficient of variation are used in the statistical analysis of data shown in Table X1.1. To ensure uniformity among laboratories using the dry sand/rubber wheel test, the standard deviation and coefficient of variation of results produced from a series of tests should be calculated by the following equations:

$$S_p = \sqrt{\frac{\sum (S_j^2)}{p}} \quad (\text{X1.1})$$

- d = deviations from average, $(\bar{x}_j - \bar{x})$
 $S_{\bar{x}}$ = $\sqrt{\frac{\sum (d^2)}{p} - 1}$
 S_L = $\sqrt{(S_p^2) - (S_r^2)}$; $S_L = 0$ if the quantity under the root sign is negative.
 S_R = $\sqrt{(S_p^2) + (S_L^2)}$, is the reproducibility standard deviation of the test method for the parameter measured.
 $V_p(\%)$ = $100(S_p)/(\bar{x})$, the estimated relative standard deviation or coefficient of variation within a laboratory for the parameter measured (repeatability).
 $V_L(\%)$ = $100(S_L)/(\bar{x})$, the estimated relative standard deviation or coefficient of variation between laboratories for the parameter measured (reproducibility).

where:

- p = number of laboratories,
 n = number of replicate tests,
 \bar{x}_j = average of n number of replicate tests of each, laboratory of parameter j ,
 S_j = standard deviation,
 \bar{x} = average of \bar{x}_j 's for all laboratories of each parameter,
 S_r = estimated repeatability standard deviation within, and a laboratory for each parameter measured.

X1.3 Typical Volume Loss Values

X1.3.1 Procedure A of the Dry Sand/Rubber Wheel Test will produce volume losses in metallic materials ranging from 0.25 to 250 mm³. The more abrasion-resistant materials will develop the least volume loss. Table X1.2 shows typical volume loss ranges that may be expected in the metals listed. They are offered as guidelines only and not as purchasing specifications or as standard reference specimens. Any material specifications involving this test method must be by agreement between the seller and the purchaser. When volume losses exceed 100 mm³, greater accuracy in material ranking is obtained by using Procedure D (see Table 2). Procedure A should be used for the more abrasion-resistant materials. Procedure E or B can be used for materials with volume losses in the range from 50 to 100 mm³.

TABLE X1.1 Statistical Analyses of Interlaboratory Test Results

Round-Robin Test Conditions	Specified Procedure	Number of Samples	Average, mm ³	Standard Deviation Within, mm ³	Standard Deviation Between, mm ³	Coefficient of Variation Within, %	Coefficient of Variation Between, %	Coefficient of Variation Total, %	Standard Deviation Total, mm ³
RR No. 15 4340 steel	E	3	51.63	1.67	0.75	3.2	1.5	3.5	1.83
RR No. 14A and 14B 4340 steel	E	3	47.74	1.84	2.46	3.9	5.2	6.04	3.07
RR No. 14A and 14B 4340 steel	B	3	91.08	2.18	4.98	2.4	3.5	6	5.44
RR No. 12 WC-14 weight % CO 0.010 in. thick	A	4	2.18	0.14	0.42	6.4	19.3	20.4	0.44
RR No. 14 hard-chrome plating 0.010 in. thick	C	3	1.33	0.1	0.25	7.4	19.1	20.5	0.27

TABLE X1.2 Volume Loss Range

	Standard Values (Mean ± Standard Deviation) ^a				
	Practice A, mm ³	Practice B, mm ³	Practice C, mm ³	Practice D, mm ³	Practice E, mm ³
AISI Tool Steel D-2 Reference Material No. 1 [#]	35.6 ± 5.2	...	...	...	...
AISI Tool Steel H-13 Reference Material No. 2 [#]	...	55.6 ± 4.2	...	...	...
AISI 4340 Steel Reference Material No. 3 [#]	91.1 ± 5.4	49.2 ± 2.9
Nonstandard Values					
316 stainless bar annealed RB-80	260 ± 20	...	...	58.5 ± 26.6	...
AISI 1050 plate-normalized 900°C (1600°F) air-cooled 24-26 HRC	80.7 ± 8.0	...	...	33.0 ± 6.0	...
17-4PH stainless-aged 500°C (925°F)-4 h at temperature, air-cooled-43 HRC	220 ± 20	122.1 ± 15.3	...	70.9 ± 6.1	...
Stellite 1016 hard surfacing overlay 57-58 HRC applied by oxyacetylene welding process (35 flame)	17 ± 4	...	...	...	...
Sintered tungsten carbide (Kennametal K-714, Valenite 2889)	1.9 ± 0.3	...	...	...	...
WC-Co flame spray coatings	2.2 ± 0.4	...	...	...	...
Hard-chrome plating	...	...	1.3 ± 0.3	...	...

^a The mean values and standard deviation for volume loss reported were calculated from the values in Research Report RR:G02.1006.

[#] See 11.5.2 for heat treat.

ANEXO A2

EXTRACTO DE LA NORMA ASTM B-117



Designation: B 117 – 03

Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation B 117; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers the apparatus, procedure, and conditions required to create and maintain the salt spray (fog) test environment. Suitable apparatus which may be used is described in Appendix X1.

1.2 This practice does not prescribe the type of test specimen or exposure periods to be used for a specific product, nor the interpretation to be given to the results.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The inch-pound units in parentheses are provided for information and may be approximate.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

B 368 Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS Test)²

D 609 Practice for Preparation of Cold-Rolled Steel Panels for Testing Paint, Varnish, Conversion Coatings, and Related Coating Products³

D 1193 Specification for Reagent Water⁴

D 1654 Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments³

E 70 Test Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode⁵

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved October 1, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1939. Last previous edition approved in 2002 as B 117 – 02.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 02.05.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.05.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

G 85 Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing⁷

3. Significance and Use

3.1 This practice provides a controlled corrosive environment which has been utilized to produce relative corrosion resistance information for specimens of metals and coated metals exposed in a given test chamber.

3.2 Prediction of performance in natural environments has seldom been correlated with salt spray results when used as stand alone data.

3.2.1 Correlation and extrapolation of corrosion performance based on exposure to the test environment provided by this practice are not always predictable.

3.2.2 Correlation and extrapolation should be considered only in cases where appropriate corroborating long-term atmospheric exposures have been conducted.

3.3 The reproducibility of results in the salt spray exposure is highly dependent on the type of specimens tested and the evaluation criteria selected, as well as the control of the operating variables. In any testing program, sufficient replicates should be included to establish the variability of the results. Variability has been observed when similar specimens are tested in different fog chambers even though the testing conditions are nominally similar and within the ranges specified in this practice.

4. Apparatus

4.1 The apparatus required for salt spray (fog) exposure consists of a fog chamber, a salt solution reservoir, a supply of suitably conditioned compressed air, one or more atomizing nozzles, specimen supports, provision for heating the chamber, and necessary means of control. The size and detailed construction of the apparatus are optional, provided the conditions obtained meet the requirements of this practice.

4.2 Drops of solution which accumulate on the ceiling or cover of the chamber shall not be permitted to fall on the specimens being exposed.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

(Fuente: ASTM B-117)

ANEXO A2 (Continuación)

4.3 Drops of solution which fall from the specimens shall not be returned to the solution reservoir for respraying.

4.4 Material of construction shall be such that it will not affect the corrosiveness of the fog.

4.5 All water used for this practice shall conform to Type IV water in Specification D 1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). This does not apply to running tap water. All other water will be referred to as reagent grade.

5. Test Specimens

5.1 The type and number of test specimens to be used, as well as the criteria for the evaluation of the test results, shall be defined in the specifications covering the material or product being exposed or shall be mutually agreed upon between the purchaser and the seller.

6. Preparation of Test Specimens

6.1 Specimens shall be suitably cleaned. The cleaning method shall be optional depending on the nature of the surface and the contaminants. Care shall be taken that specimens are not recontaminated after cleaning by excessive or careless handling.

6.2 Specimens for the evaluation of paints and other organic coatings shall be prepared in accordance with applicable specification(s) for the material(s) being exposed, or as agreed upon between the purchaser and the supplier. Otherwise, the test specimens shall consist of steel meeting the requirements of Practice D 609 and shall be cleaned and prepared for coating in accordance with the applicable procedure of Practice D 609.

6.3 Specimens coated with paints or nonmetallic coatings shall not be cleaned or handled excessively prior to test.

6.4 Whenever it is desired to determine the development of corrosion from an abraded area in the paint or organic coating, a scratch or scribed line shall be made through the coating with a sharp instrument so as to expose the underlying metal before testing. The conditions of making the scratch shall be as defined in Test Method D 1654, unless otherwise agreed upon between the purchaser and the seller.

6.5 Unless otherwise specified, the cut edges of plated, coated, or duplex materials and areas containing identification marks or in contact with the racks or supports shall be protected with a suitable coating stable under the conditions of the practice.

NOTE 1—Should it be desirable to cut test specimens from parts or from preplated, painted, or otherwise coated steel sheet, the cut edges shall be protected by coating them with paint, wax, tape, or other effective media so that the development of a galvanic effect between such edges and the adjacent plated or otherwise coated metal surfaces, is prevented.

7. Position of Specimens During Exposure

7.1 The position of the specimens in the salt spray chamber during the test shall be such that the following conditions are met:

7.1.1 Unless otherwise specified, the specimens shall be supported or suspended between 15 and 30° from the vertical and preferably parallel to the principal direction of flow of fog through the chamber, based upon the dominant surface being tested.

7.1.2 The specimens shall not contact each other or any metallic material or any material capable of acting as a wick.

7.1.3 Each specimen shall be placed to permit unencumbered exposure to the fog.

7.1.4 Salt solution from one specimen shall not drip on any other specimen.

NOTE 2—Suitable materials for the construction or coating of racks and supports are glass, rubber, plastic, or suitably coated wood. Bare metal shall not be used. Specimens shall preferably be supported from the bottom or the side. Slotted wooden strips are suitable for the support of flat panels. Suspension from glass hooks or waxed string may be used as long as the specified position of the specimens is obtained, if necessary by means of secondary support at the bottom of the specimens.

8. Salt Solution

8.1 The salt solution shall be prepared by dissolving 5 ± 1 parts by mass of sodium chloride in 95 parts of water conforming to Type IV water in Specification D 1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). Careful attention should be given to the chemical content of the salt. The salt used shall be sodium chloride with not more than 0.3 % by mass of total impurities. Halides (Bromide, Fluoride, and Iodide) other than Chloride shall constitute less than 0.1 % by mass of the salt content. Copper content shall be less than 0.3 ppm by mass. Sodium chloride containing anti-caking agents shall not be used because such agents may act as corrosion inhibitors. See Table 1 for a listing of these impurity restrictions. Upon agreement between the purchaser and the seller, analysis may be required and limits established for elements or compounds not specified in the chemical composition given above.

TABLE 1 Maximum Allowable Limits for Impurity Levels in Sodium Chloride^{A,B}

Impurity Description	Allowable Amount
Total Impurities	≤ 0.3 %
Halides (Bromide, Fluoride and Iodide) excluding Chloride	≤ 0.1 %
Copper	< 0.3 ppm
Anti-caking Agents	0.0 %

^A A common formula used to calculate the amount of salt required by mass to achieve a 5 % salt solution of a known mass of water is:

$$.053 \times \text{Mass of Water} = \text{Mass of NaCl required}$$

The mass of water is 1 g per 1 mL. To calculate the mass of salt required in grams to mix 1 L of a 5 % salt solution, multiply .053 by 1000 g (35.27 oz., the mass of 1 L of water). This formula yields a result of 53 g (1.87 oz.) of NaCl required for each liter of water to achieve a 5 % salt solution by mass.

The 0.053 multiplier for the sodium chloride used above is derived by the following:

$$1000 \text{ g (mass of a full L of water) divided by } 0.95$$

(water is only 95 % of the total mixture by mass) yields 1053 g

This 1053 g is the total mass of the mixture of one L of water with a 5 % sodium chloride concentration. 1053 g minus the original weight of the L of water, 1000 g, yields 53 g for the weight of the sodium chloride. 53 g of total sodium chloride divided by the original 1000 g of water yields a 0.053 multiplier for the sodium chloride.

As an example: to mix the equivalent of 200 L (52.83 gal) of 5 % sodium chloride solution, mix 10.6 kg (23.37 lb) of sodium chloride into 200 L (52.83 gal) of water. 200 L of water weighs 200,000 g. 200,000 g of water x .053 (sodium chloride multiplier) = 10,600 g of sodium chloride, or 10.6 kg.

^B In order to ensure that the proper salt concentration was achieved when mixing the solution, it is recommended that the solution be checked with either a salimeter hydrometer or specific gravity hydrometer. When using a salimeter hydrometer, the measurement should be between 4 and 8 % at 25°C (77°F). When using a specific gravity hydrometer, the measurement should be between 1.0255 and 1.0400 at 25°C (77°F).

ANEXO A2 (Continuación)

8.2 The pH of the salt solution shall be such that when atomized at 35°C (95°F) the collected solution will be in the pH range from 6.5 to 7.2 (Note 3). Before the solution is atomized it shall be free of suspended solids (Note 4). The pH measurement shall be made at 25°C (77°F) using a suitable glass pH-sensing electrode, reference electrode, and pH meter system in accordance with Test Method E 70.

NOTE 3—Temperature affects the pH of a salt solution prepared from water saturated with carbon dioxide at room temperature and pH adjustment may be made by the following three methods:

(1) When the pH of a salt solution is adjusted at room temperature, and atomized at 35°C (95°F), the pH of the collected solution will be higher than the original solution due to the loss of carbon dioxide at the higher temperature. When the pH of the salt solution is adjusted at room temperature, it is therefore necessary to adjust it below 6.5 so the collected solution after atomizing at 35°C (95°F) will meet the pH limits of 6.5 to 7.2. Take about a 50-mL sample of the salt solution as prepared at room temperature, boil gently for 30 s, cool, and determine the pH. When the pH of the salt solution is adjusted to 6.5 to 7.2 by this procedure, the pH of the atomized and collected solution at 35°C (95°F) will come within this range.

(2) Heating the salt solution to boiling and cooling to 35°C (95°F) and maintaining it at 35°C (95°F) for approximately 48 h before adjusting the pH produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35°C (95°F).

(3) Heating the water from which the salt solution is prepared to 35°C (95°F) or above, to expel carbon dioxide, and adjusting the pH of the salt solution within the limits of 6.5 to 7.2 produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35°C (95°F).

NOTE 4—The freshly prepared salt solution may be filtered or decanted before it is placed in the reservoir, or the end of the tube leading from the solution to the atomizer may be covered with a double layer of cheesecloth to prevent plugging of the nozzle.

NOTE 5—The pH can be adjusted by additions of dilute ACS reagent grade hydrochloric acid or sodium hydroxide solutions.

9. Air Supply

9.1 The compressed air supply to the Air Saturator Tower shall be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. (Note 6) This air should be maintained at a sufficient pressure at the base of the Air Saturator Tower to meet the suggested pressures of Table 2 at the top of the Air Saturator Tower.

NOTE 6—The air supply may be freed from oil and dirt by passing it through a suitable oil/water extractor (that is commercially available) to stop any oil from reaching the Air Saturator Tower. Many oil/water extractors have an expiration indicator, proper preventive maintenance intervals should take these into account.

9.2 The compressed air supply to the atomizer nozzle or nozzles shall be conditioned by introducing it into the bottom of a tower filled with water. A common method of introducing the air is through an air dispersion device (X1.4.1). The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. It is common practice to maintain the temperature in this tower between 46 and 49°C (114–121°F) to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure during the atomization process. Table 2 in 9.3 of this practice shows the temperature, at different pressures, that are commonly used to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

9.3 Careful attention should be given to the relationship of tower temperature to pressure since this relationship can have

a direct impact to maintaining proper collection rates (Note 7). It is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog as listed in Table 2.

TABLE 2 Suggested Temperature and Pressure guideline for the top of the Air Saturator Tower for the operation of a test at 35°C (95°F)

Air Pressure, kPa	Temperature, °C	Air Pressure, PSI	Temperature, °F
83	46	12	114
96	47	14	117
110	48	16	119
124	49	18	121

NOTE 7—If the tower is run outside of these suggested temperature and pressure ranges to achieve proper collection rates as described in 10.2 of this practice, other means of verifying the proper corrosion rate in the chamber should be investigated, such as the use of control specimens (panels of known performance in the test conducted). It is preferred that control panels be provided that bracket the expected test specimen performance. The controls allow for the normalization of test conditions during repeated running of the test and will also allow comparisons of test results from different repeats of the same test. (Refer to Appendix X3, Evaluation of Corrosive Conditions, for mass loss procedures).

10. Conditions in the Salt Spray Chamber

10.1 *Temperature*—The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at 35 + 1.1 – 1.7°C (95 + 2 – 3°F). Each set point and its tolerance represents an operational control point for equilibrium conditions at a single location in the cabinet which may not necessarily represent the uniformity of conditions throughout the cabinet. The temperature within the exposure zone of the closed cabinet shall be recorded (Note 8) at least twice a day at least 7 h apart (except on Saturdays, Sundays, and holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir).

NOTE 8—A suitable method to record the temperature is by a continuous recording device or by a thermometer which can be read from outside the closed cabinet. The recorded temperature must be obtained with the salt spray chamber closed to avoid a false low reading because of wet-bulb effect when the chamber is open.

10.2 *Atomization and Quantity of Fog*—Place at least two clean fog collectors per atomizer tower within the exposure zone so that no drops of solution will be collected from the test specimens or any other source. Position the collectors in the proximity of the test specimens, one nearest to any nozzle and the other farthest from all nozzles. A typical arrangement is shown in Fig. 1. The fog shall be such that for each 80 cm² (12.4 in.²) of horizontal collecting area, there will be collected from 1.0 to 2.0 mL of solution per hour based on an average run of at least 16 h (Note 9). The sodium chloride concentration of the collected solution shall be 5 ± 1 mass % (Notes 9–11). The pH of the collected solution shall be 6.5 to 7.2. The pH measurement shall be made as described in 8.2 (Note 3).

NOTE 9—Suitable collecting devices are glass or plastic funnels with

ANEXO A3

EXTRACTO DE LA NORMA ASTM E112-12



Designation: E112 – 12

Standard Test Methods for Determining Average Grain Size¹

This standard is issued under the fixed designation E112; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

INTRODUCTION

These test methods of determination of average grain size in metallic materials are primarily measuring procedures and, because of their purely geometric basis, are independent of the metal or alloy concerned. In fact, the basic procedures may also be used for the estimation of average grain, crystal, or cell size in nonmetallic materials. The comparison method may be used if the structure of the material approaches the appearance of one of the standard comparison charts. The intercept and planimetric methods are always applicable for determining average grain size. However, the comparison charts cannot be used for measurement of individual grains.

1. Scope

1.1 These test methods cover the measurement of average grain size and include the comparison procedure, the planimetric (or Jeffries) procedure, and the intercept procedures. These test methods may also be applied to nonmetallic materials with structures having appearances similar to those of the metallic structures shown in the comparison charts. These test methods apply chiefly to single phase grain structures but they can be applied to determine the average size of a particular type of grain structure in a multiphase or multiconstituent specimen.

1.2 These test methods are used to determine the average grain size of specimens with a unimodal distribution of grain areas, diameters, or intercept lengths. These distributions are approximately log normal. These test methods do not cover methods to characterize the nature of these distributions. Characterization of grain size in specimens with duplex grain size distributions is described in Test Methods E1181. Measurement of individual, very coarse grains in a fine grained matrix is described in Test Methods E930.

1.3 These test methods deal only with determination of planar grain size, that is, characterization of the two-dimensional grain sections revealed by the sectioning plane. Determination of spatial grain size, that is, measurement of the size of the three-dimensional grains in the specimen volume, is beyond the scope of these test methods.

1.4 These test methods describe techniques performed manually using either a standard series of graded chart images for the comparison method or simple templates for the manual counting methods. Utilization of semi-automatic digitizing tablets or automatic image analyzers to measure grain size is described in Test Methods E1382.

1.5 These test methods deal only with the recommended test methods and nothing in them should be construed as defining or establishing limits of acceptability or fitness of purpose of the materials tested.

1.6 The measured values are stated in SI units, which are regarded as standard. Equivalent inch-pound values, when listed, are in parentheses and may be approximate.

1.7 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.8 The paragraphs appear in the following order:

Section	Number
Scope	1
Referenced Documents	2
Terminology	3
Significance and Use	4
Generalities of Application	5
Sampling	6
Test Specimens	7
Calibration	8
Preparation of Photomicrographs	9
Comparison Procedure	10
Planimetric (Jeffries) Procedure	11
General Intercept Procedures	12
Heyn Linear Intercept Procedure	13
Circular Intercept Procedures	14
Hilgard Single-Circle Procedure	14.2

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E04 on Metallography and are the direct responsibility of Subcommittee E04.08 on Grain Size.

Current edition approved Nov. 15, 2012. Published January 2013. Originally approved in 1955. Last previous edition approved 2010 as E112 – 10. DOI: 10.1520/E0112-12.

(Fuente: ASTM E-112)

ANEXO A3 (Continuación)

Abrams Three-Circle Procedure	14.3
Statistical Analysis	15
Specimens With Non-equiaxed Grain Shapes	16
Specimens Containing Two or More Phases or Constituents	17
Report	18
Precision and Bias	19
Keywords	20
Annexes:	
Basis of ASTM Grain Size Numbers	Annex A1
Equations for Conversions Among Various Grain Size Measurements	Annex A2
Austenite Grain Size, Ferritic and Austenitic Steels	Annex A3
Fracture Grain Size Method	Annex A4
Requirements for Wrought Copper and Copper-Base Alloys	Annex A5
Application to Special Situations	Annex A6
Appendices:	
Results of Interlaboratory Grain Size Determinations	Appendix X1
Referenced Adjuncts	Appendix X2

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- E3 Guide for Preparation of Metallographic Specimens
- E7 Terminology Relating to Metallography
- E407 Practice for Microetching Metals and Alloys
- E562 Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count
- E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- E883 Guide for Reflected-Light Photomicrography
- E930 Test Methods for Estimating the Largest Grain Observed in a Metallographic Section (ALA Grain Size)
- E1181 Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes
- E1382 Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis

2.2 ASTM Adjuncts:

- 2.2.1 For a complete adjunct list, see Appendix X2

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in these test methods, see Terminology E7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *ASTM grain size number*—the ASTM grain size number, G , was originally defined as:

$$N_{AE} = 2^{G-1} \quad (1)$$

where N_{AE} is the number of grains per square inch at 100X magnification. To obtain the number per square millimetre at 1X, multiply by 15.50.

3.2.2 *grain*—that area within the confines of the original (primary) boundary observed on the two-dimensional plane-of-polish or that volume enclosed by the original (primary) boundary in the three-dimensional object. In materials contain-

ing twin boundaries, the twin boundaries are ignored, that is, the structure on either side of a twin boundary belongs to the grain.

3.2.3 *grain boundary intersection count*—determination of the number of times a test line cuts across, or is tangent to, grain boundaries (triple point intersections are considered as 1-½ intersections).

3.2.4 *grain intercept count*—determination of the number of times a test line cuts through individual grains on the plane of polish (tangent hits are considered as one half an interception; test lines that end within a grain are considered as one half an interception).

3.2.5 *intercept length*—the distance between two opposed, adjacent grain boundary intersection points on a test line segment that crosses the grain at any location due to random placement of the test line.

3.3 Symbols:

α	= matrix grains in a two phase (constituent) microstructure.
A	= test area.
\bar{A}	= mean grain cross sectional area.
A_{ℓ}	= grain elongation ratio or anisotropy index for a longitudinally oriented plane.
\bar{d}	= mean planar grain diameter (Plate III).
\bar{D}	= mean spatial (volumetric) grain diameter.
f	= Jeffries multiplier for planimetric method.
G	= ASTM grain size number.
$\bar{\ell}$	= mean lineal intercept length.
$\bar{\ell}_{\alpha}$	= mean lineal intercept length of the α matrix phase in a two phase (constituent) microstructure.
$\bar{\ell}_{\ell}$	= mean lineal intercept length on a longitudinally oriented surface for a non-equiaxed grain structure.
$\bar{\ell}_{t}$	= mean lineal intercept length on a transversely oriented surface for a non-equiaxed grain structure.
$\bar{\ell}_{p}$	= mean lineal intercept length on a planar oriented surface for a non-equiaxed grain structure.
ℓ_0	= base intercept length of 32.00 mm for defining the relationship between G and ℓ (and N_{ℓ}) for macroscopically or microscopically determined grain size by the intercept method.
L	= length of a test line.
M	= magnification used.
M_b	= magnification used by a chart picture series.
n	= number of fields measured.
N_{α}	= number of α grains intercepted by the test line in a two phase (constituent) microstructure.
N_A	= number of grains per mm ² at 1X.
$N_{A\alpha}$	= number of α grains per mm ² at 1X in a two phase (constituent) microstructure.
N_{AE}	= number of grains per inch ² at 100X.
$N_{A\ell}$	= N_A on a longitudinally oriented surface for a

ANEXO A3 (Continuación)

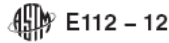


TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
0.0	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

equally spaced circles having a total circumference of 500 mm, as shown in Fig. 5. Successively apply this pattern to at least five blindly selected and widely spaced fields, separately recording the count of intersections per pattern for each of the tests. Then, determine the mean lineal intercept, its standard deviation, 95 % confidence limit, and percent relative accuracy. For most work, a relative accuracy of 10 % or less represents an acceptable degree of precision. If the calculated relative accuracy is unacceptable for the application, count additional fields until the calculated percent relative accuracy is acceptable. The specific procedure is as follows:

14.3.2.1 Examine the grain structure and select a magnification that will yield from 40 to 100 intercepts or intersection counts per placement of the three circle test grid. Because our goal is to obtain a total of about 400 to 500 counts, the ideal magnification is that which yields about 100 counts per placement. However, as the count per placement increases from 40 to 100, errors in counting become more likely. Because the grain structure will vary somewhat from field to field, at least five widely spaced fields should be selected. Some metallographers feel more comfortable counting 10 fields with about 40 to 50 counts per field. For most grain structures, a total count of 400 to 500 intercepts or intersections over 5 to 10 fields produces better than 10 % relative accuracy. Fig. 6 shows the relationship between the average intercept count and the microscopically determined ASTM grain size number as a function of magnification.

14.3.2.2 Blindly select one field for measurement and apply the test pattern to the image. A transparency of the pattern may be applied directly to the ground glass, or to a photomicrograph when permanent records are desired. Direct counting using a properly sized reticle in the eyepiece is allowable, but it may here be expected that some operators will find difficulty in

used to determine the microscopically measured ASTM grain size using the equations in Table 6, the data shown graphically in Fig. 6, or the data in Table 4.

15. Statistical Analysis

15.1 No determination of average grain size can be an exact measurement. Thus, no determination is complete without also calculating the precision within which the determined size may, with normal confidence, be considered to represent the actual average grain size of the specimen examined. In accordance with common engineering practice, this section assumes normal confidence to represent the expectation that the actual error will be within the stated uncertainty 95 % of the time.

15.1.1 Many specimens vary measurably in grain size from one field of view to another, this variation being responsible for a major portion of the uncertainty. Minimum effort in manual methods, to obtain a required precision, justifies individual counts whose precision is comparable to this natural variability (7). The high local precision that may be obtained by machine methods often will yield only a small increase in overall precision unless many fields also are measured, but does help distinguish natural variability from inaccuracies of counting.

15.2 After the desired number of fields have been measured, calculate the mean value of \bar{N}_A or $\bar{\ell}$ from the individual field values according to:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \tag{13}$$

where X_i represents an individual value, \bar{X} is the mean and n is the number of measurements.

15.3 Calculate the standard deviation of the individual measurements according to the usual equation:

ANEXO A4

ESTRACTO DE LA NORMA ASTM G1-1999



Designation: G 1 – 90 (Reapproved 1999)^{ε1}

Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation G 1; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

^{ε1} NOTE—Editorial corrections were made throughout in January 1999.

1. Scope

1.1 This practice covers suggested procedures for preparing bare, solid metal specimens for tests, for removing corrosion products after the test has been completed, and for evaluating the corrosion damage that has occurred. Emphasis is placed on procedures related to the evaluation of corrosion by mass loss and pitting measurements.

NOTE 1—**Caution:** In many cases the corrosion product on the reactive metals titanium and zirconium is a hard and tightly bonded oxide that defies removal by chemical or ordinary mechanical means. In many such cases, corrosion rates are established by mass gain rather than mass loss.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific precautionary statements, see Note 1 and Note 6.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels²
- D 1193 Specification for Reagent Water³
- D 1384 Test Method for Corrosion Test for Engine Coolants in Glassware⁴
- D 2776 Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods)⁵
- G 15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing⁶
- G 16 Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data⁶

G 31 Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals⁶

G 33 Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens⁶

G 46 Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion⁶

G 50 Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals⁶

G 78 Guide for Crevice Corrosion Testing of Iron Base and Nickel Base Stainless Alloys in Seawater and Other Chloride-Containing Aqueous Environments⁶

3. Terminology

3.1 See Terminology G 15 for terms used in this practice.

4. Significance and Use

4.1 The procedures given are designed to remove corrosion products without significant removal of base metal. This allows an accurate determination of the mass loss of the metal or alloy that occurred during exposure to the corrosive environment.

4.2 These procedures, in some cases, may apply to metal coatings. However, possible effects from the substrate must be considered.

5. Reagents and Materials

5.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available.⁷ Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

5.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type IV of Specification D 1193.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-1 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved March 30, 1990. Published May 1990. Originally published as G 1 – 67. Last previous edition G 1 – 88.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 01.03.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.05.

⁵ *Discontinued*—Replaced by Guide G 96. See *1990 Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

⁷ *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Analar Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmacopeial Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO A4 (Continuación)

G 1

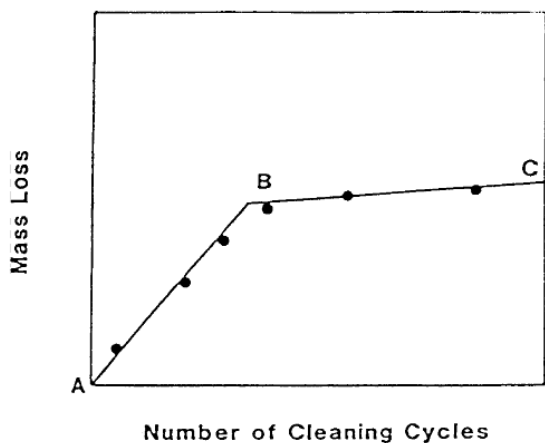


FIG. 1 Mass Loss of Corroded Specimens Resulting from Repetitive Cleaning Cycles

removal of corrosion products. Removal can often be confirmed by examination with a low power microscope (for example, 7× to 30×). This is particularly useful with pitted surfaces when corrosion products may accumulate in pits. This repeated treatment may also be necessary because of the requirements of 7.1.2.1. Following the final treatment, the specimens should be thoroughly rinsed and immediately dried.

7.1.4 All cleaning solutions shall be prepared with water and reagent grade chemicals.

7.2 Chemical procedures involve immersion of the corrosion test specimen in a specific solution that is designed to remove the corrosion products with minimal dissolution of any base metal. Several procedures are listed in Table A1.1. The choice of chemical procedure to be used is partly a matter of trial and error to establish the most effective method for a specific metal and type of corrosion product scale.

NOTE 6—Caution: These methods may be hazardous to personnel.

7.2.1 Chemical cleaning is often preceded by light brushing (non metallic bristle) or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products.

7.2.2 Intermittent removal of specimens from the cleaning solution for light brushing or ultrasonic cleaning can often facilitate the removal of tightly adherent corrosion products.

7.2.3 Chemical cleaning is often followed by light brushing or ultrasonic cleaning in reagent water to remove loose products.

7.3 Electrolytic cleaning can also be utilized for removal of corrosion products. Several useful methods for corrosion test specimens of iron, cast iron, or steel are given in Table A2.1.

7.3.1 Electrolytic cleaning should be preceded by brushing or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products. Brushing or ultrasonic cleaning should also follow the electrolytic cleaning to remove any loose slime or deposits. This will help to minimize any redeposition of metal from reducible corrosion products that would reduce the apparent mass loss.

7.4 Mechanical procedures can include scraping, scrubbing, brushing, ultrasonic cleaning, mechanical shocking, and im-

part blasting (for example, grit blasting, water-jet blasting, and so forth). These methods are often utilized to remove heavily encrusted corrosion products. Scrubbing with a nonmetallic bristle brush and a mild abrasive-distilled water slurry can also be used to remove corrosion products.

7.4.1 Vigorous mechanical cleaning may result in the removal of some base metal; therefore, care should be exercised. These should be used only when other methods fail to provide adequate removal of corrosion products. As with other methods, correction for metal loss due to the cleaning method is recommended. The mechanical forces used in cleaning should be held as nearly constant as possible.

8. Assessment of Corrosion Damage

8.1 The initial total surface area of the specimen (making corrections for the areas associated with mounting holes) and the mass lost during the test are determined. The average corrosion rate may then be obtained as follows:

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad (1)$$

where:

K = a constant (see 8.1.2),

T = time of exposure in hours,

A = area in cm^2 ,

W = mass loss in grams, and

D = density in g/cm^3 (see Appendix X1).

8.1.1 Corrosion rates are not necessarily constant with time of exposure. See Practice G 31 for further guidance.

8.1.2 Many different units are used to express corrosion rates. Using the units in 7.1 for T , A , W , and D , the corrosion rate can be calculated in a variety of units with the following appropriate value of K :

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^6
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimeters per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometers per year ($\mu\text{m/y}$)	8.76×10^7
picometers per second (pm/s)	2.78×10^6
grams per square meter per hour ($\text{g/m}^2\text{-h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
micrograms per square meter per second ($\mu\text{g/m}^2\text{-s}$)	$2.78 \times 10^6 \times D$

NOTE 7—If desired, these constants may also be used to convert corrosion rates from one set of units to another. To convert a corrosion rate in units X to a rate in units Y , multiply by K_Y/K_X ; for example:

$$15 \text{ mpy} = 15 \times (2.78 \times 10^6)/(3.45 \times 10^6) \text{ pm/s} \quad (2)$$

8.2 Corrosion rates calculated from mass losses can be misleading when deterioration is highly localized, as in pitting or crevice corrosion. If corrosion is in the form of pitting, it may be measured with a depth gage or micrometer calipers with pointed anvils (see Guide G 46). Microscopical methods will determine pit depth by focusing from top to bottom of the pit when it is viewed from above (using a calibrated focusing knob) or by examining a section that has been mounted and metallographically polished. The pitting factor is the ratio of the deepest metal penetration to the average metal penetration (as measured by mass loss).


NOTE 8—See Guide G 46 for guidance in evaluating depths of pitting.

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO B: HOJAS TÉCNICAS DE ESPECIFICACIONES


ANEXO B1


HOJA DE SEGURIDAD DEL GRANULO BASÁLTICO (ABRASIVO MINERAL)



MINERALES DE USO AGRÍCOLA-INDUSTRIAL

Vicente Rocafuerte 26-49 entre Junín y Argentinos
 Telef.: 032965389 - 0995391082
 E-mail: vitecalcareos@yahoo.es
 RIOBAMBA - ECUADOR



1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA	
Nombre comercial	GRANULO BASÁLTICO - G 0.5 GRANULO BASÁLTICO - G 1.5 GRANULO BASÁLTICO - G 2.0
Sinónimos	Basaltos, Andesitas, Taquilita, Roca abrasiva
Proveedor	VITECAL
Dirección	Vicente Rocafuerte 26 – 49 entre Junín y Argentinos. Riobamba - Ecuador
Contacto Telefónico	03-2965389 / 0995391082
Contacto Electrónico	vitecalcareos@yahoo.es
Número de Registro	En trámite.
2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES	
Descripción del producto	Material de forma angular, de alta pureza en sílice. Se obtiene al triturar microbasalto (taquilita), roca con alto poder abrasivo.
Composición	100 % roca mineral volcánica de color negro natural (microbasalto)
Estado Físico	Sólido. Partículas esféricas o angulares.
3. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS O PELIGROS	
Descripción de los peligros	 ATENCIÓN
Ingestión	No presenta efectos adversos, una cantidad importante puede resultar en una obstrucción interna o molestias.
Inhalación	Puede causar irritación en el tracto respiratorio, produciendo estornudos o ligera irritación nasal.
Contacto con los ojos	Puede causar irritación y lagrimeo.
Contacto con la piel	El contacto prolongado o repetitivo puede producir efecto de resequedad, en algunas personas puede causar ligera irritación
Efectos crónicos (Cáncer)	NTP: No enlistado IARC: No enlistado OSHA: No regulado

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO B1 (Continuación)

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS	
Ingestión	Enjuagar la boca con abundante agua, repetir este proceso por 3 – 5 ocasiones. En caso de ser necesario suministre atención médica.
Inhalación	En caso de inhalación retire a la persona afectada hasta un lugar con aire fresco. En caso de ser necesario suministre atención médica.
Contacto con la piel	Lave con abundante agua y jabón.
Ojos	Lavar los ojos por 15 minutos con abundante agua. Acuda al médico si la irritación persiste
5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIO	
Punto de inflamación (°C)	N.A.
Temperatura de auto ignición (°C)	N.A.
Límites de inflamabilidad	N.A.
Peligro de incendio o explosión	No inflamable
Medios de extinción	Se puede usar cualquier tipo de extintor
6. MEDIDAS QUE DEBEN TOMARSE EN CASO DE DERRAME ACCIDENTAL	
Métodos de aislamiento y limpieza	El polvo derramado puede recogerse o retirarse sin peligro, atendiendo la información que se da en las medidas de protección personal
7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO	
Almacenamiento	Si se conserva en lugares frescos y a la sombra se puede almacenar por tiempo indefinido.
Manipulación	Utilizar equipos de protección para prevenir las partículas pequeñas del producto (guantes, mascarillas y gafas de seguridad). Manipular en lugares con ventilación adecuada
8. CONTROL DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL	
Ingestión	No comer, no tomar, no fumar en el área de trabajo.
Inhalación	Utilizar respiradores apropiados para filtrar polvos finos.
Piel	Utilizar guantes y ropa de trabajo apropiada.
Ojos	Utilizar gafas de seguridad ajustadas o protección facial.
9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	
Familia Química	Basaltos y Andesitas.
Dureza (Mohos)	6,5
Densidad relativa	2.5 gr/cc
Humedad máxima	0,1 %
Presentación	Sacos de polipropileno de 45 kg ± 0,5 kg
Granulometría	Material pasante en mallas 30 y retenido en malla 60 Mesh. (G 0,5) Material pasante en mallas 8 y retenido en malla 30 Mesh. (G 1,5) Si el cliente necesita otra granulometría, se fabrica sobre pedido.
10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD	
Química	No reacciona con productos ácidos ni alcalinos.
Polimerización peligrosa	No se produce.

ANEXO B1 (Continuación)

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA	
Toxicidad	No es tóxico, revisar riesgos para la salud y medidas de primeros auxilios.
Sensibilidad al producto	En personas alérgicas al polvo, puede ser riesgoso por su granulometría.
12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA	
Es una sustancia de carácter ecológico neutro, no causa ninguna contaminación al medio ambiente.	
13. CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL	
General	Los residuos o envases vacíos deben manipularse y eliminarse de acuerdo con las legislaciones local/nacional vigentes.
14. TRANSPORTE	
Transporte Terrestre	No está designado como sustancia peligrosa.
Número de Identificación (UN)	N.A.
Tipo de envase	Sacos de Polipropileno
Peligros en el transporte	Ninguno
15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA	
CLASIFICACIÓN SEGÚN NFPA 704	Peligro a la salud = 0; Peligro de Inflamabilidad = 0; Peligro de Reactividad = 0. 
CLASIFICACIÓN SEGÚN UN	No regulado
16. INFORMACIÓN ADICIONAL	
La información relacionada con este producto puede no ser válida si se este es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos productivos, en este caso es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.	

Elaborado, Revisado y Aprobado por:	VITECAL, Minerales de Uso Agrícola - Industrial	Fecha	ENERO-2014
-------------------------------------	---	-------	------------

ANEXO B2

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA GRANALLA METÁLICA (ABRASIVO METÁLICO)



New Harmony » New Solutions™

www.sinto.com.br

Quality Certificate

Customer: SUDAMERICANA PROYECTOS & DESARROLLO S.A.	Invoice : 12022	Certificate Nº 80/12
Material: Steel grit G-40H	Quantity : 8,0 t	

Chemical Composition (According to SAE-J 827) Rev. Jul/05

	C	Mn	Si	P	S
Specification:	0.80 - 1.20	0.60 - 1.20	min. 0.40	Max.0.05	max. 0.05
Findings:	0.91	0.80	0.67	0,022	0,015

Hardness HRC (According to SAE J 1993) Rev. Jul/05

Specification %	90 % mín 60 HRC
Findings %	100 %

Granulometric Distribution(SAE J 444) Rev. Jul/05

Screen (mm):	1,00	0,42	0,30
Especif. %	0	Min. 70	Min.80
Findings %	0	100,0	100,0

Density (According to SAE-J 827) Rev. Jul/05


	Density
Specification:	Min. 7,40 g/cm ³
Findings:	7,52 g/cm ³

Microstructure (According to SAE-J 827) Rev. Jul/05

Specification: Tempered Martensite
Findings: Tempered Martensite with fine

LOT(S): 8 PALLETS 4111

Fabrica de Granalha


Pedro Luiz L. da Costa
Controle de Qualidade

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO B3

ESPECIFICACIONES DE LA ALEACIÓN MICROPULVERIZADA EUTALLOY 11496



DESCRIPTION:

Eutalloy 11496 is a multi-component nickel-base alloy powder used to produce hard, low friction overlay deposits for wear or corrosion control. Composition based on AMS 4775C and precise particle sizing ensures consistent deposition, fusing and hardness. It is a hot process powder designed to be applied and fused using a "puddle type" torch such as the Eutalloy or Ultrajet Eutalloy thermal spray processes. For applications on surfaces of steels, stainless steels, cast irons and nickel-base alloy that are subject to abrasion, metal to metal wear or in some cases corrosion.

TECHNICAL DATA:

Powder Properties

Nominal Composition: Nickel, Balance Chromium, 15.5% Boron, 3.2% Silicon, 3.8% Iron, 3.5% Carbon, 0.7%
Magnetic Properties: This alloy contains enough Chromium, Boron, and Silicon to make it non-magnetic (ie Primarily Austenitic Structure).
Nominal Particle Size: -125 micron x down
Hall Flow Rate: 15 seconds
Bulk Density: 4.3 g/cc
Approximate Melting Range: Solidus: 1750°F (955°C)
Liquidus: 1950°F (1065°C)
Powder Coverage: 50 inch² per pound @ 1/16" thickness.

Coating Properties

Hardness: Rockwell C scale 59
Density: 7.6 g/cc
Approximate Thermal Expansion: 200-1000° F 7.4 x 10⁻⁶/F
1000-1400° F 7.2 x 10⁻⁶/F
1400-1800° F 8.0 x 10⁻⁶/F
Electrical conductivity: Should be similar to NiChrome (80/20) alloy

HEALTH & SAFETY:

Observe normal spraying practices, respiratory protection and proper air flow pattern advised. For general spray practices, see AWS Publications AWS C2. 1-73, "Recommended Safe Practices for Thermal Spraying and AWS T55-85, "Thermal Spraying, Practice, Theory and Application." Thermal spraying is a completely safe process when performed in accordance with proper safety measures. Become familiar with local safety regulations before starting spray operations. DO NOT operate your spraying equipment or use the spray material supplied, before you have thoroughly read the equipment instruction manual.

Refer to the Eutectic web site for Material Safety Data Sheet (MSDS) information.

DISREGARDING THESE INSTRUCTIONS MAY BE HAZARDOUS TO YOUR HEALTH

PROCEDURE FOR USE:

Finishing Procedure:

Grinding Wheel Type: Green Silicon Carbide
Grit Size: 60 - 80
Grade: H (soft)
Structure: 5
Bond Type: Vitrified
Wheel Speed: Use Manufacturer's Recommendation
Work Speed: 50 -65 surface feet per minute

Traverse Speed

Roughing: 5-15 inches per minute
Finishing: 3-8 inches per minute

In-Feed

Roughing: 0.001 inches per pass
Finishing: 0.0005 inches per pass or less
Coolant: Flood coolant with rust inhibitors in 2-5% concentration

Notes:

1. Before grinding, all edges and ends of coating must be chamfer ground.
2. Frequently dress the grinding wheel face to reduce friction and heat.

APPLICATIONS:

- Cams Screws
- Ceramic die cutters
- Camshafts
- Ball joints
- Plug gauges
- Molds Nozzles
- Mandrels
- Tool rests
- Valve seats
- Tappets

(Fuente: Thermal Spray Coating Catalogue – Castolin Eutectic)

ANEXO B4

ESPECIFICACIONES DE LA ARENA DE SÍLICE



PROPIEDADES QUÍMICAS

%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%AL ₂ O ₃	%TiO ₂	%Na ₂ O	%K ₂ O	CaO
98.927	0.055	0.503	0.077	0.073	0.007	0.019

SE CONTROLA

% Fe ₂ O ₃	RETENIDO MALLA 40 MAX.	PASA MALLA 140 MAX.
0.051 Min. 0.060 Max.	5.0 %	1.0 % MAX

NOMBRE QUÍMICO: Dióxido de silicio, SiO₂.

CARACTERÍSTICAS: La arena sílice está constituida por granos duros, subangulares y densos de material cuarzo en un 98.8% de pureza, resistente a la degradación durante su manipulación y uso. Se encuentra visiblemente libre de arcilla, polvo, materiales orgánicos.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Punto de Ebullición:	2230 °C.	Punto de Fusión:	1676 °C.
Densidad:			2.65 g/cm ³ .
Solubilidad en agua:			INSOLUBLE.
Solubilidad en ácido fluorhídrico:			Si
Aspecto, Sabor y Olor:			Color amarillento, Blanco Rosado, Naranja Café claro; Sin Olor Ni Sabor.
Densidad aparente g/ml:			1.62
Dureza :			7.0 Escala MOHS

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO B5

ESPECIFICACIONES DEL ACERO AISI 1045

► Cód. IBCA: 760 \cong C45 \cong AISI 1045



Información general							
Acero al carbono sin alea de esmerada manufactura, con buena tenacidad. Características en su alta uniformidad y rendimiento. Puede utilizarse en condición de suministro o con tratamiento térmico de temple y revenido. Aplicable a partes relativamente simples de máquinas. Dureza de suministro aproximada: 200 HB.							
Análisis típico %	C	SI	Mn	P	S	Cr	NI
C45	0.42 - 0.50	≤ 0.40	0.50 - 0.80	0.045	0.045	≤ 0.40	≤ 0.10
AISI 1045	0.43 - 0.50	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	0.030	0.050		
Normas equivalentes	AISI (1045), SAE (C1045), W.Nr (1.1820), DIN (CK45)						
Código de color	Rojo / Plomo						

Propiedades mecánicas		Tratamiento térmico	
Resistencia a la tracción	65 kg/mm ²	TIPO	°C
Esfuerzo de cedencia	32 kg/mm ²	Forjado	800 - 1050
Elongación, A5	min 10%	Normalizado	830 - 850
Reducción de área	40 %	Temple (agua)	770 - 810
Dureza	220 - 235	Temple (aceite)	790 - 830
		Revenido (herramientas de corte)	100 - 300
		Revenido de bonificación	550 - 650

(Fuente: Catálogo de aceros IVAN BOHMAN)

ACERO AISI-SAE 1045 (UNS G10450)

1. Descripción: es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condición de suministro. Este acero medio carbono puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Cuando se hacen prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad es adecuado para la fabricación de componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A108

3. Propiedades mecánicas: Dureza 163 HB (84 HRb)
 Esfuerzo de fluencia 310 MPa (45000 PSI)
 Esfuerzo máximo 565 MPa (81900 PSI)
 Elongación 16% (en 50 mm)
 Reducción de área (40%)
 Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)
 Maquinabilidad 57% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.43 – 0.50 % C
 0.60 – 0.90 % Mn
 0.04 % P máx
 0.05 % S máx

(Fuente: Catálogo de aceros SUMITEC)

ANEXO B5 (Continuación)

Table 1 Mechanical properties of selected steels

Steel	Condition	Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm, %	Reduction in area, %	Hardness, HB
		MPa	ksi	MPa	ksi			
Carbon steel bar^(a)								
1010	Hot rolled	325	47	180	26	28	50	95
	Cold drawn	365	53	305	44	20	40	105
1018	Hot rolled	400	58	220	32	25	50	116
	Cold drawn	440	64	370	54	15	40	126
1045	Hot rolled	565	82	310	45	16	40	163
	Cold drawn	625	91	530	77	12	35	179
	Annealed, cold drawn	585	85	505	73	12	45	170

Table 10 Carbon steel compositions

Applicable to semifinished products for forging, hot-rolled and cold-finished bars, wire rods, and seamless tubing

Designation		Cast or heat chemical ranges and limits ^(a) , %			
UNS No.	SAE-AISI No.	C	Mn	P max	S max
G10100	1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040	0.050
G10180	1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040	0.050
G10450	1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.040	0.050

(Fuente: Metals Handbook Desk Edition - ASM International)

ANEXO C: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO Y CERTIFICADOS

ANEXO C1

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE CORROSIÓN ACELERADA EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA SEGÚN LA ASTM B-117



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE METALOGRAFÍA,
DESGASTE Y FALLA

INFORME TÉCNICO Orden de Trabajo No. 0004782

Solicitado por: Ing. Jorge Alejandro Paredes
Muestra Suministrada por: Ing. Jorge Alejandro Paredes
Tipo de trabajo: Ensayo de Corrosión Cámara de Niebla salina (sal neutra).
Fecha: Quito, 04 de Julio del 2017

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, de la Escuela Politécnica Nacional veintiocho muestras de acero de aprox. 2 x 2 cm, con el fin de realizar el análisis de corrosión por 100 horas (14 probetas) y 200 horas (14 probetas) respectivamente, en la cámara de niebla salina, en base a la norma ASTM B117-16. Fotografía N° 1.

2. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS.

Las muestras a ser analizadas se identifican de la siguiente manera:

Tabla N° 1. Identificación de elementos

Número	Código	Cantidad	Tipo de recubrimiento según solicitante
1	C1	1	Polvo Metálico
2	C2	1	Polvo Metálico
3	C3	1	Polvo Metálico
4	C4	1	Polvo Metálico
5	C5	1	Polvo Metálico
6	C6	1	Polvo Metálico



Orden de Trabajo No. 0004782

Página 1 de 4

(Fuente: Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla EPN)

ANEXO C1 (Continuación)

7	C7	1	Polvo Metálico
8	C8	1	Polvo Metálico
9	C9	1	Polvo Metálico
10	C10	1	Polvo Metálico
11	C11	1	Polvo Metálico
12	C12	1	Polvo Metálico
13	C13	1	Polvo Metálico
14	C14	1	Polvo Metálico
15	C15	1	Polvo Metálico
16	C16	1	Polvo Metálico
17	C17	1	Polvo Metálico
18	C18	1	Polvo Metálico
19	C19	1	Polvo Metálico
20	C20	1	Polvo Metálico
21	C21	1	Polvo Metálico
22	C22	1	Polvo Metálico
23	C23	1	Polvo Metálico
24	C24	1	Polvo Metálico
25	100 horas	2	N/A
26	200 horas	2	N/A

3. PROCEDIMIENTO

- a. Cada una de las muestras se limpian cuidadosamente con agua corriente, jabón y se secan antes de ser colocadas en la cámara de niebla salina al 5%.
- b. La superficie principal de las muestras a ser evaluadas se posicionan con una inclinación aproximada de 15 y 30° con respecto a la vertical, las piezas se acomodan con soportes de madera con el objetivo de exponer la mayor área superficial posible. Las muestras se ubican en zonas diferentes dentro de la cámara (tiempo de ensayo 100 y 200 horas respectivamente). Fotografía N° 2.



Orden de Trabajo No. 0004782

Página 2 de 4

ANEXO C1 (Continuación)

- c. Luego del ensayo (Ver Fotografías N° 3 y N° 4), las piezas se limpian con agua corriente y jabón con el fin de remover suciedad y depósitos salinos. Ver Fotografías N° 5 y N° 6.

Atentamente:


Informe

Elaborado por:

Revisado por:


Ing. Patricia Proaño
Especialista del Laboratorio de
Metalografía,
Desgaste y Falla.



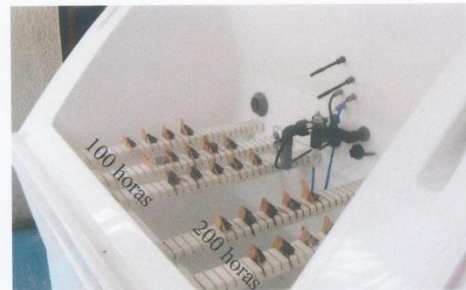

Ing. Carlos Díaz
Jefe del Laboratorio de
Metalografía,
Desgaste y Falla.

Nota: Se anexan 6 fotografías.

ANEXO

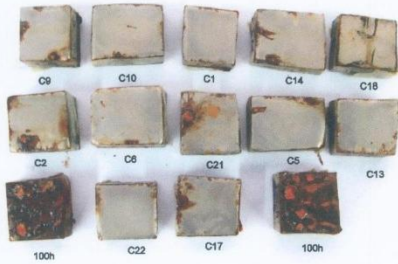


Fotografía N° 1. Probetas de acero, suministradas al laboratorio de metalografía.

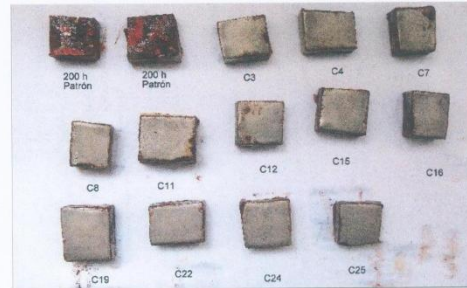


Fotografía N° 2. Elementos ubicados en la cámara de niebla salina.

ANEXO C1 (Continuación)



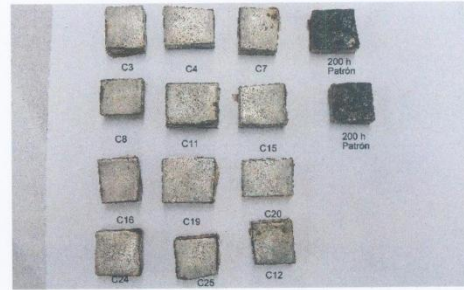
Fotografía N° 3. Probetas de acero, ensayo de 100 horas al salir de la cámara de niebla salina.



Fotografía N° 4. Probetas de acero, ensayo de 200 horas al salir de la cámara de niebla salina.



Fotografía N° 5. Probetas de acero, ensayo de 100 horas despues de lavarlas.

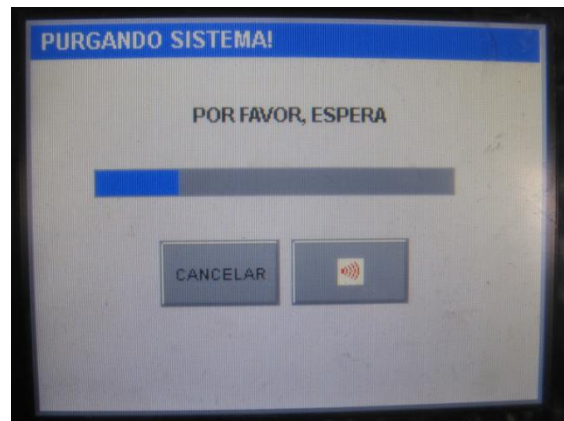


Fotografía N° 6. Probetas de acero, ensayo de 200 horas despues de lavarlas.



ANEXO C1 (Continuación)

Programación de parámetros en la cámara de niebla salina



ANEXO C2

CERTIFICADO DE CALIDAD DE LA SOLUCIÓN SALINA (CLORURO DE SODIO) UTILIZADA EN EL ENSAYO DE CORROSIÓN ACELERADA EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA

Corro-Salt NaCl  **ascott**
testing climate resistance to the limit

Certificate of Conformity

Certificate Number: SOP11305
Date of Issue: 9th February 2015
Customer Name & Address: Escuela Politecnica Nacional
Ladron de Guevara
E11-253
Quito
Ecuador

Product Code	Description	P.O. No.	Qty	Batch No.:
SALA520	5Kg Barrel of Sodium Chloride	FOC SAMPLE	1	300813

Ascott declare that the Sodium Chloride listed above, is from the same batch as the sample analysed in the attached report ref.: 19575/Ref.1

With respect to the purity of the Corro-Salt, we further confirm it to be in compliance with the requirements of the following salt spray test standards:
ASTM B117 & ISO 9227

Signed on behalf of Ascott Analytical Equipment Ltd



Mr C J Gates
Director

Ascott Analytical Equipment Limited,
6 - 8, Gerard,
Lichfield Rd Industrial Estate,
Tamworth,
Staffs,
B79 7UW

Telephone: +44 (0) 1827 318040
Fax: +44 (0) 1827 318049
E-mail: info@ascott-analytical.com
Website: www.ascott-analytical.com
www.ascottshop.com
VAT Number: GB 555 1717 39

(Fuente: Laboratorio de Materiales EPN)

ANEXO C3

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE BALANZA DE PRECISIÓN SARTORIUS

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		Elicrom Cia. Ltda.		Servicio de Acreditación Ecuatoriano		ilac-MRA		ACCREDITED		
Ciudadela Guayaquil, calle 1era mz 21 solar 10 Guayaquil - Ecuador Pbx: 04-2282007 Fax: ext. 403 http://www.elicrom.com mail: ventas@elicrom.com		Acreditación N° OAE L.C.C 10-029 LABORATORIO DE CALIBRACIÓN		Certificate No. 4286 01						
CERTIFICADO No: CC-1782-001-17										
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE										
EMPRESA:	ENERGIAS DEL AGRO SAN JUAN SA ENERAGRO									
DIRECCIÓN:	COMUNA SAN ANTONIO VIA SAN JUAN Km 3.5 SN									
TELÉFONO:	42762454									
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO										
EQUIPO:	BALANZA DE PRECISIÓN	UNIDAD DE MEDIDA:	Gramos (g)							
MARCA:	SARTORIUS	RESOLUCIÓN (d):	0,1							
MODELO:	TE4101	VALOR DE VERIFICACIÓN (e):	1							
SERIE:	NO ESPECIFICA	CAPACIDAD MÁXIMA:	4100							
CÓDIGO:	NO ESPECIFICA	CAPACIDAD MÍNIMA (OIML):	2							
CLASE DE EXACTITUD (OIML):	III MEDIA	UBICACIÓN:	LAB. DE AZUCAR							
PATRÓN/EQUIPO(S) UTILIZADO (S)										
CÓDIGO	NOMBRE	MARCA	CLASE	SERIE	FECHA CAL.	FECHA PROX. CAL.				
EL-PT.485	JUEGO DE PESAS 1 g - 2 kg	HAFNER	CLASE F1	9671075	14-nov.-16	14-nov.-17				
EL-PT.469	BAROMETRO DIGITAL	CONTROL COMPANY	1081	150322687	15-abr.-17	15-abr.-18				
EL-PT.422	TERMOHIGROMETRO	TAYLOR	1523	NO ESPECIFICA	29-mar.-17	29-sep.-17				
CALIBRACIÓN										
PROCEDIMIENTO:	PEC.EL.01									
MÉTODO EMPLEADO:	COMPARACIÓN DIRECTA CON MASAS CERTIFICADAS PATRÓN									
CONDICIONES AMBIENTALES:	TEMPERATURA (°C):	26,5	HUMEDAD RELATIVA (%):	50	PRESIÓN ATMOSFÉRICA (hPa):	1003				
ENSAYO DE EXCENTRICIDAD										
UBICACIÓN	INDICACIÓN	ERROR	E.M.P.	¿CUMPLE?						
No. 1	500,0	0,0	1,0	Cumple						
No. 2	500,0	0,0	1,0	Cumple						
No. 3	500,0	0,0	1,0	Cumple						
No. 4	500,0	0,0	1,0	Cumple						
No. 5	500,0	0,0	1,0	Cumple						
LINEALIDAD / HISTÉRESIS										
Nominal de masa	0	2	10	100	500	1000	2000	3500	4000	4100
Masa certificada	0,0000	2,0000	10,0001	100,0000	499,9986	1000,0000	1999,9963	3499,9986	3999,9963	4099,9963
Incertidumbre Patrón	0,00000	0,000040	0,000060	0,00016	0,0025	0,0050	0,010	0,018	0,020	0,020
Lectura balanza ↑	0,0	2,0	10,0	100,0	500,0	1000,1	2000,0	3500,1	4000,2	4100,2
Lectura balanza ↓	0,0	2,0	10,0	100,0	500,0	1000,1	2000,1	3500,1	4000,1	
Error de Histéresis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
Error Ascendente ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2
Error Descendente ↓	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	
Error Máximo Permitido	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0
¿CUMPLE?	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
ENSAYO DE REPETIBILIDAD										
Nominal	3500									
No. Pesada	Indicación									
No. 1	3500,2									
No. 2	3500,1									
No. 3	3500,1									
No. 4	-									
No. 5	-									
No. 6	-									
E.M.P.	3,0									
MÁX-MÍN	0,1									
¿CUMPLE?	Cumple									
INCERTIDUMBRES (Para el valor más alto del ensayo)										
Contribución a la incertidumbre por:	Tipo de Distribución:	Coef. de Sensibilidad	Incertidumbre Gramos (g)							
Repetibilidad	T de Students	1	0,05774							
Resolución	Rectangular	1	0,02887							
Excentricidad	Conv. rect/trian.	1	0,00000							
Linealidad	Gaussiana	1	0,04933							
Histéresis	Gaussiana	1	0,00000							
Deriva de los instrumentos	Rectangular	1	0,00191							
Efecto de convección	Rectangular	1	0,00043							
Peso Patrón/Densidad del aire	Gaussiana	1	0,01022							
Incertidumbre Combinada	0,082									
Grados Efectivos de Libertad (Veff)	8									
Factor de Cobertura (K)	2,23									
INCERTIDUMBRE ALEATORIA (EXPANDIDA)	0,18									
DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD										
La balanza cumple los requisitos 3.6.1 (Repetibilidad), 3.6.2 (Excentricidad) y 3.5 (Errores Máximos Permitidos) de la OIML R 76-1:2006										
OBSERVACIONES										
E.M.P. = Error Máximo Permitido por la OIML R 76-1:2006. Si la clase de la balanza es I o II, en la prueba de repetibilidad habrá 6 lecturas, para clases III y IIII habrá 3 lecturas. El cálculo de la incertidumbre expandida se realizó en base a la guía OAE G02 R01, multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura k=2,23, que para una distribución t (de Student) con Veff= 8 (grados efectivos de libertad) corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95,45%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-4-02. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom Calibración. El presente certificado se refiere solamente al equipo arriba descrito al momento del ensayo.										
CALIBRACIÓN REALIZADA POR: Eduardo Montaña										
FECHA DE CALIBRACIÓN: 23 de Junio de 2017										
AUTORIZADO POR: Ing. Sabino Pineda GERENTE TÉCNICO			RECIBIDO POR: RESPONSABLE - CLIENTE							

(Fuente: Laboratorio de Azúcar Energías del Agro S.A.)

ANEXO C4



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE BALANZA DE PRECISIÓN AE ADAM

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		Elicrom Cia. Ltda.		Servicio de Acreditación Ecuatoriano		ILAC-MRA		ACCREDITED		
Ciudadela Guayaquil, calle 1era mz 21 solar 10 Guayaquil - Ecuador Pbx: 04-2282007 Fax: ext. 403 http://www.elicrom.com mail: ventas@elicrom.com		Acreditación N° OAE L.C. C 10-009 LABORATORIO DE CALIBRACIÓN		Certificate No. 4286 01						
CERTIFICADO No: CC-1782-002-17										
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE										
EMPRESA:		ENERGIAS DEL AGRO SAN JUAN SA ENERAGRO								
DIRECCIÓN:		COMUNA SAN ANTONIO VIA SAN JUAN Km 3.5 SN								
TELÉFONO:		42762454								
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO										
EQUIPO:		BALANZA DE PRECISIÓN		UNIDAD DE MEDIDA:		Gramos (g)				
MARCA:		AE ADAM		RESOLUCIÓN (d):		0,1				
MODELO:		PGL 4001		VALOR DE VERIFICACIÓN (e):		0,1				
SERIE:		AE770421		CAPACIDAD MÁXIMA:		4000				
CÓDIGO:		NO ESPECIFICA		CAPACIDAD MÍNIMA (OIML):		5				
CLASE DE EXACTITUD (OIML):		II ALTA		UBICACIÓN:		MICROBIOLOGIA				
PATRÓN/EQUIPO(S) UTILIZADO (S)										
CÓDIGO	NOMBRE	MARCA	CLASE	SERIE	FECHA CAL.	FECHA PROX. CAL.				
EL.PT.485	JUEGO DE PESAS 1 g - 2 kg	HAFNER	CLASE F1	9671075	14-nov.-16	14-nov.-17				
EL.PT.469	BARÓMETRO DIGITAL	CONTROL COMPANY	1081	150322687	15-abr.-17	15-abr.-18				
EL.PT.422	TERMOHIGROMETRO	TAYLOR	1523	NO ESPECIFICA	29-mar.-17	29-sep.-17				
CALIBRACIÓN										
PROCEDIMIENTO:		PEC.EL.01								
MÉTODO EMPLEADO:		COMPARACIÓN DIRECTA CON MASAS CERTIFICADAS PATRÓN								
CONDICIONES AMBIENTALES:		TEMPERATURA (°C): 26,6		HUMEDAD RELATIVA (%): 50		PRESIÓN ATMOSFÉRICA (hPa): 1004				
ENSAYO DE EXCENTRICIDAD										
UBICACIÓN	INDICACIÓN	ERROR	E.M.P.	¿CUMPLE?						
No. 1	500,0	0,0	0,1	Cumple						
No. 2	500,0	0,0	0,1	Cumple						
No. 3	500,0	0,0	0,1	Cumple						
No. 4	500,0	0,0	0,1	Cumple						
No. 5	500,0	0,0	0,1	Cumple						
LINEALIDAD / HISTÉRESIS										
Nominal de masa	0	5	10	500	1000	2000	2500	3000	3500	4000
Massa certificada	0,0000	5,0001	10,0001	499,9986	1000,0000	1999,9963	2499,9986	3000,0000	3499,9986	3999,9963
Incertidumbre Patrón	0,00000	0,000050	0,000060	0,0025	0,0050	0,010	0,013	0,015	0,018	0,020
Lectura balanza ↑	0,0	5,0	10,0	500,0	1000,0	2000,0	2500,0	3000,0	3500,0	4000,0
Lectura balanza ↓	0,0	5,0	10,0	500,0	1000,0	2000,0	2500,0	3000,0	3500,1	
Error de Histéresis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Error Ascendente ↑	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Error Descendente ↓	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
Error Máximo Permitido	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
¿CUMPLE?	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
ENSAYO DE REPETIBILIDAD										
Nominal	3500									
No. Pesada	Indicación									
No. 1	3500,0									
No. 2	3500,0									
No. 3	3500,1									
No. 4	3500,1									
No. 5	3500,0									
No. 6	3500,1									
E.M.P.	0,3									
MÁX-MÍN	0,1									
¿CUMPLE?	Cumple									
INCERTIDUMBRES (Para el valor más alto del ensayo)										
Contribución a la incertidumbre por:		Tipo de Distribución:		Coef. de Sensibilidad		Incertidumbre Gramos (g)				
Repetibilidad		T de Students		1		0,05477				
Resolución		Rectangular		1		0,02887				
Excentricidad		Conv. rect/trian.		1		0,00000				
Linealidad		Gaussiana		1		0,00151				
Histéresis		Gaussiana		1		0,00000				
Deriva de los instrumentos		Rectangular		1		0,00209				
Efecto de convección		Rectangular		1		0,00041				
Peso Patrón/Densidad del aire		Gaussiana		1		0,01014				
Incertidumbre Combinada						0,063				
Grados Efectivos de Libertad (Veff)						9				
Factor de Cobertura (K)						2,22				
INCERTIDUMBRE ALEATORIA (EXPANDIDA)						0,14				
DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD										
La balanza cumple los requisitos 3.6.1 (Repetibilidad), 3.6.2 (Excentricidad) y 3.5 (Errores Máximos Permitidos) de la OIML R 76-1:2006										
OBSERVACIONES										
E.M.P. = Error Máximo Permitido por la OIML R 76-1:2006. Si la clase de la balanza es I o II, en la prueba de repetibilidad habrá 6 lecturas, para clases III y IIII habrá 3 lecturas. El cálculo de la incertidumbre expandida se realizó en base a la guía OAE G02 R01, multiplicando la incertidumbre típica por el factor de cobertura k=2,22 , que para una distribución t (de Student) con Veff= 9 (grados efectivos de libertad) corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95,45%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-402. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom Calibración. El presente certificado se refiere solamente al equipo arriba descrito al momento del ensayo.										
CALIBRACIÓN REALIZADA POR: Eduardo Montaño										
FECHA DE CALIBRACIÓN: 23 de Junio de 2017										
AUTORIZADO POR: Ing. Sabino Pineda GERENTE TÉCNICO		RECIBIDO POR:			RESPONSABLE - CLIENTE					

(Fuente: Laboratorio de Azúcar Energías del Agro S.A.)

ANEXO C5

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO PARA MEDICIÓN DE HUMEDAD SHIMADZU MOC-120H

		CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Ciudadela Guayaquil, calle 1era mz 21 solar 10 Guayaquil - Ecuador Pbx: 04-2282007 Fax: ext. 403 http://www.elicrom.com mail: ventas@elicrom.com														
CERTIFICADO No:		1633-01-16														
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE																
EMPRESA: ENERGÍAS DEL AGRO SAN JUAN SA ENERAGRO																
DIRECCIÓN: COMUNA SAN ANTONIO VIA SAN JUAN KM 3.5 SN																
TELÉFONO: 42762454																
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO																
EQUIPO:	MULTIPARÁMETRO															
MARCA:	SHIMADZU															
MODELO/TIPO:	MOC 120															
SERIE:	6204630															
CÓDIGO ASIGNADO EN ELICROM:	EC-2016-1632															
UNIDAD DE MEDIDA:	mV															
RESOLUCIÓN:	1															
RANGO:	1000 mV															
EQUIPOS UTILIZADOS																
CODIGO	NOMBRE	MARCA	MODELO	SERIE	FECHA CAL.	PROX. CAL.										
EL.MR.101	SOLUCION REDUCTORA PARA ELECTRODOS ORP	HACH	CAT.2965349	A5229	13-ago.-15	13-ago.-16										
EL.PT.365	TERMOHIGROMETRO	CENTER	342	140103655	02-abr-16	02-abr-17										
CALIBRACIÓN																
PROCEDIMIENTO:	GENERAL															
LUGAR DE CALIBRACIÓN:	LABORATORIO ELICROM															
TEMPERATURA MEDIA:	23,4 °C															
HUMEDAD MEDIA:	47,3 %HR															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Unidad de Medida</th> <th>Patrón</th> <th>Equipo</th> <th>Corrección</th> <th>Incertidumbre</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>mV (milivoltio)</td> <td>326,0</td> <td>328</td> <td>-2</td> <td>0,58</td> </tr> </tbody> </table>							Unidad de Medida	Patrón	Equipo	Corrección	Incertidumbre	mV (milivoltio)	326,0	328	-2	0,58
Unidad de Medida	Patrón	Equipo	Corrección	Incertidumbre												
mV (milivoltio)	326,0	328	-2	0,58												
OBSERVACIONES																
La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-4/02. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom Calibración. El presente certificado se refiere solamente al equipo arriba descrito al momento del ensayo.																
CALIBRACIÓN REALIZADA POR:		Alex Bajarña														
FECHA CALIBRACIÓN:		2016-07-05														
		AUTORIZADO POR: Ing. Sabino Pineda GERENTE TÉCNICO			RECIBIDO POR: RESPONSABLE - CLIENTE											

(Fuente: Laboratorio de Azúcar Energías del Agro S.A.)

ANEXO C6

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Y CALIDAD DEL EQUIPO HAVER & BOECKER TYLER PARA ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSBAU UND BRANDSCHUTZ

IBMB **MIPA**
TU BRAUNSCHWEIG

Zertifikat / Certificate

Nr. / No. Z-8041/8875

Hiermit wird bestätigt, dass das Messgerät
This is to certify that the measuring instrument

HAVER BSA
(ident.-Nr. / No. 25)

des Betreibers / of the manufacturer
Haver & Boecker Drahtweberel
D-59302 Oelde, Germany

die Anforderungen erfüllt von / meets the requirements of
ISO 3310-1:2000
(Absatz 5.2, Prüfverfahren 3 / chap. 5.2, test method 3)

und / and
ASTM E 11-01

(Prüfverfahren nach Annex A1.4 und A1.5 / test methods according to annex A1.4 and A1.5)

an Analysensiebe mit Rahmendurchmessern bis 300 mm (Messfähigkeitindex $C_m \geq 3,5$).
for test sieves with frame diameters up to 300 mm (measurement capability index $C_m \geq 3,5$).

Dieses Zertifikat gilt bis zu wesentlichen Änderungen an Hard- oder Software,
längstens bis zum 14.09.2007.
*The validity of this certificate ends when the hardware or software has been significantly
changed, at the latest on September 14, 2007.*

Braunschweig, 2005-09-15



Dr.-Ing. Rohling
stellv. Leiterin der Zertifizierungsstelle
Deputy head of certification

Materiellprüfstelle (MPF)
für das Bauwesen
Steinboverstraße 52
D-38106 Braunschweig

Tel +49 (0)531 251-0400
Fax +49 (0)531 391-9993
E-Mail info@mpa-bs.de
http://www.mpa-bs.de

Niedersächsische Landesbauverwaltung
Roh 1 091020 930 (BLZ 252 50000)
Süd-Cook-NOLADE 2H
LIZ-Id Nr. MPA-DE-183930004



Beauftragt durch: *anerkannt* nach Landesbauordnung und Bauproduktengesetz, notified body (7701-CP2)
nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert: Prüfzertifikate: DAP-PL-2004.01 - DAP-PL-2004.02 - DAP-PL-2004.03 - DAP-PL-2004.04 - DAP-PL-2004.05
nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert: Inspektionsstelle: DAP-PL-2004.06 - nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert: Kalibrierlabor: DND-PL-2250
Die Akkreditierungen gelten für die in den Urkunden aufgeführten Prüfverfahren

(Fuente: Laboratorio de Azúcar Energías del Agro S.A.)

ANEXO C7

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN E INSPECCIÓN DEL EQUIPO PARA MEDICIÓN DE DUREZA DIGIMESS DP300



Proyecto: Project:	SURCOACTIVO	PLANT SECTION: PROYECT	Pag. 6 / 16
Cliente: Client:	ENERGIAS DEL AGRO S.A.	Inspection Date:	06/07/2015
		Report Date:	07/07/2015

Type of equipment	Identification No.	Status of calibration
Portatil hardness test device + pattern	Digimess, DP-300, EME-07-026	On vigor

HARDNESS TEST ON SURFACE

ITP 3.4 + 3.5 + 3.6 / Control of equipment calibration Hardness test + Preparation of Report

Calibration certificate of the hardness test pattern and calibration of laboratory machine using the pattern was checked (see **pic. 37,38**) (close of **remark n2**).

Preparation of test coupon was done. Brinell hardness test in laboratory was conducted according ASTM A370 15 & 16, and witnessed (see **pic. 39, 40**). Apparatus, Test Specimen and Procedure met with chapter 16.2, 16.3 and 16.4. Results of test agree with specified values (máx. 155HB-225HB).

Preparation of test sample was done for portable Brinell test, that was conducted also according standards (see **pic. 41,42,43,44,45**). Test sample was considered to be a piece of the flange in order to reproduce the real conditions as best as possible. Results of test agree with specified values (máx. 155HB-225HB), and are very similar than got in laboratory test.

Hardness / Samples			Average			
1	207 HB	2	207 HB	3	207 HB	207 HB

Draft test report with manual-written down values were performed and signed by all attendants. Final report will be performed by XXXX along this week. If necessary that this inspector will sign, please advise.

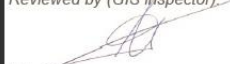

Result: **ACCEPTABLE**.



Pic.43: Calibrating hardness tester device with pattern




Pic.44: Detail of pattern (hardness test)


Realizado por (inspector GIS): Submitted by (GIS inspector): Fdo./Sign:  Revisado por (coordinador GIS): Reviewed by (GIS inspector): Fdo./Sign: 	DEVIATIONS / OBSERVATIONS: DESVIACIONES / REMARKS: 1) Test samples and used coupons stored in reserved area at XXX. EPC will take care about it, waiting for XXX instructions. 2) XXX provided ISO 17025 certification for laboratories, included as annex. 3) Impact test not satisfactory (not meet with requirements). 4) Transition temperature not found. 5) Not clear the analysis of metallographic structure. Needs evaluation by specialist.
--	---

(Fuente: Laboratorio de metrología Energías del Agro S.A.)

ANEXO C8

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO MEDIDOR DE ESPESOR POR ULTRASONIDO DEMAQ QS5






Medidores de espesores y corrosión Serie QS5

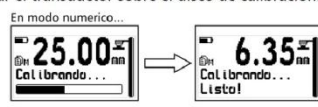
Calibración de cero (Calibración modo Auto)

El QS5 utiliza un nuevo sistema de calibración de cero (delay) que se activa con solo al apoyar el transductor sobre el disco de calibración.



Disco de calibración
(frente del equipo)

En modo numerico...



En modo grafico...

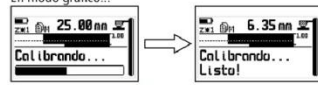
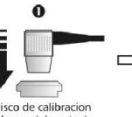


Figura 2.6: Procedimiento de calibración de cero

Una vez terminado el proceso de calibración el equipo vuelve a medir normalmente y ya está listo para medir en acero que es la velocidad que se carga al calibrar.


Calibración de uno o dos puntos conocidos

Para obtener mediciones más precisas (especialmente si cambia el transductor) el QS5 puede calibrarse con muestras provistas por el usuario. A continuación se explica el procedimiento:




Disco de calibración
(frente del equipo)


1



2

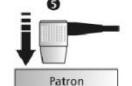


3




Salir (Cal. Parcial)

4




Salir (Calibración Parcial)

5




Patron

6




Editar valor medido

7



Para confirmar nuevo valor







8




Salir (Calibración Parcial)

9 Repetir el procedimiento desde el punto 5 usando otro patron de mayor espesor.

Figura 2.7: Procedimiento de calibración de 1 y 2 puntos

1. Para iniciar el proceso mida sobre el disco de calibración. Una vez terminada la calibración del disco el equipo le pedira que mida la primera muestra y vera dos opciones: Edit y Salir.
2. Toque  (Salir) para cerrar la calibración con el disco del equipo o mida la muestra correspondiente al primer punto de calibración.
3. Con la medición de la muestra en pantalla toque  (Edit) y ajuste usando los cursores el valor de modo tal que coincida con el espesor de la muestra que acaba de medir.
4. Una vez ajustado el valor toque  y el equipo le pedira que mida la segunda muestra. Toque  (Salir) para cerrar la calibración con un punto o mida la muestra correspondiente al segundo punto.
5. Con la medición de la muestra en pantalla toque  (Edit) y ajuste usando los cursores el valor de modo tal que coincida con el espesor de la muestra que acaba de medir. Una vez ajustado el valor toque  para terminar la calibración de dos puntos.



Instrumentos desarrollados y fabricados por DEMAQ SRL
 Washington 3894/8 | C.A.B.A. 1430EVB | Argentina
 Ventas: +54 11 4542-7783 | Servicio Técnico: +54 11 4541-3647
 Correo: infodemeq@demeq.com | Web: www.demeq.com

(Fuente: Laboratorio de metrología Energías del Agro S.A.)

197

ANEXO C9

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD ELCOMETER 123



Elcometer 123 Medidor de perfil de superficie

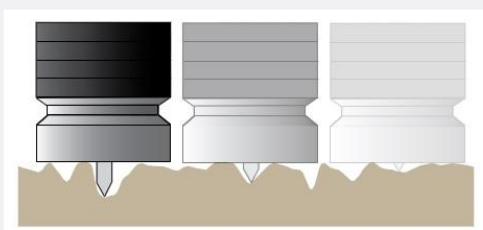
El Medidor de perfil de superficie Elcometer 123 es un medidor analógico fácil de utilizar que mide la altura entre picos y valles de una superficie granallada de una manera similar al Elcometer 224.

- Disponible en versiones métricas y británicas



NORMAS:
ASTM D 4417-B, SANS 5772, SSPC PA 17,
US Navy NSI 009-32, US Navy PPI 63101-000

Cómo medir el perfil de la superficie



Procedimiento de calibración

1. Calibrar a cero en un azulejo de vidrio.
2. Garantizar que la sonda esta a 90 ° en el sustrato para garantizar lecturas precisas.
3. Tome un mínimo de 10 lecturas en un área para establecer el promedio de perfil de la superficie.

Características Técnicas

C

Referencia	Descripción	Certificado
E123A-M-	Medidor de perfil de superficie Elcometer 123, Versión métrica	o
E123A-E-	Medidor de perfil de superficie Elcometer 123, Versión británica	o
Rango	0 - 1000µm (0 - 40mils)	Escala 2µm (0.1 milipulg)
Dimensiones	105 x 55 x 25mm (4.1 x 2.2 x 1")	Peso 335g (8oz)
Lista de empaque	Medidor de perfil de superficie Elcometer 123, lámina de vidrio, llave Allen de 2 mm, estuche de transporte e instrucciones de funcionamiento	

© 2015 Elcometer Limited. Elcometer es una marca comercial registrada de Elcometer Limited. Todas las demás marcas comerciales se dan por reconocidas. En cumplimiento de nuestra política de mejora continua, Elcometer se reserva el derecho a modificar las especificaciones sin previo aviso.

www.elcometer.com

V6: 23.03.2015

(Fuente: Laboratorio de metrología Energías del Agro S.A.)

ANEXO D: RESULTADOS Y PROCEDIMIENTOS

ANEXO D1

RESULTADOS DE MEDICIONES DE ESPESOR, RUGOSIDAD Y DUREZA DEL BLINDAJE EN LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DEL VIRADOR DEL MOLINO DE CAÑA

Diente	Rugosidad (mils)			Espesor (mm)			Dureza Brinell (HB)		
	Flanco		\bar{x}	Flanco 1		Y	Flanco 1		%
	1	2		Inicial	Final		Inicial	Final	
1	4,60	4,30	4,45	7,77	8,77	1,00	152,10	243,20	59,80
2	4,70	4,60	4,65	7,69	8,70	1,01	145,1	254,5	75,30
3	4,30	4,90	4,60	7,75	8,76	1,01	147,3	247,8	68,20
4	4,30	4,20	4,25	7,70	8,73	1,03	145,5	251,9	73,10
5	4,60	4,50	4,55	7,68	8,72	1,04	142,7	242,3	69,70
6	4,70	4,20	4,45	7,65	8,65	1,00	149,5	248,7	66,30
7	4,30	3,80	4,05	7,71	8,75	1,04	148,4	253,4	70,70
8	4,60	4,70	4,65	7,70	8,70	1,00	146,2	250,4	71,20
9	4,90	4,50	4,70	7,72	8,73	1,01	147,2	254,6	72,90
10	4,70	4,60	4,65	7,70	8,73	1,03	149,1	245,4	64,50
11	4,10	4,50	4,30	7,67	8,68	1,01	147,4	248,1	68,30
12	4,50	4,70	4,60	7,80	8,76	0,96	145,2	243,8	67,90
13	4,90	5,00	4,95	7,62	8,67	1,05	148,6	246,7	66,00
14	4,20	4,50	4,35	7,88	8,85	0,97	148,3	253,3	70,80
15	4,50	4,30	4,40	7,50	8,50	1,00	147,0	250,7	70,50
16	4,60	4,40	4,50	7,64	8,65	1,01	145,6	249,8	71,50
17	4,70	4,40	4,55	7,58	8,59	1,01	142,7	246,6	72,80
18	4,30	4,50	4,40	7,67	8,72	1,05	148,4	252,1	69,80
19	4,60	4,20	4,40	7,77	8,79	1,02	146,7	247,5	68,70
20	4,10	4,20	4,15	7,58	8,64	1,06	146,2	250,2	71,10
21	4,40	4,20	4,30	7,62	8,62	1,00	142,7	248,5	74,10
22	4,70	4,60	4,65	7,74	8,77	1,03	147,1	245,5	66,80
23	4,30	4,50	4,40	7,69	8,71	1,02	145,2	247,9	70,70
24	4,50	4,50	4,50	7,67	8,67	1,00	149,3	247,3	65,60
25	4,70	4,10	4,40	7,63	8,65	1,02	150,1	248,4	65,40
26	4,10	4,50	4,30	7,68	8,68	1,00	147,8	246,8	66,90
27	4,80	4,70	4,75	7,60	8,64	1,04	152,6	249,1	63,2
28	4,50	4,30	4,40	7,65	8,67	1,02	147,2	254,1	72,6
29	4,70	4,70	4,70	7,59	8,62	1,03	151,1	248,0	64,1
30	4,70	4,50	4,60	7,58	8,63	1,05	152,6	245,5	60,8
31	4,50	4,80	4,65	7,63	8,67	1,04	149,5	247,3	65,4
32	4,70	4,20	4,45	7,63	8,63	1,00	146,7	243,6	66,0
33	4,20	4,00	4,10	7,68	8,68	1,00	152,7	247,8	62,2
34	4,80	5,20	5,00	7,54	8,60	1,06	154,1	246,4	59,8
35	4,50	4,60	4,55	7,65	8,67	1,02	145,5	251,4	72,7
36	4,60	4,90	4,75	7,68	8,68	1,00	146,3	254,6	74,0
37	4,50	4,20	4,35	7,59	8,64	1,05	149,4	251,2	68,1
38	4,70	4,40	4,55	7,58	8,57	0,99	147,5	247,6	67,8
39	4,60	4,70	4,65	7,61	8,62	1,01	148,5	245,5	65,3
40	4,30	4,50	4,40	7,70	8,70	1,00	146,7	247,1	68,4
41	4,20	4,50	4,35	7,68	8,67	0,99	146,7	252,4	72,0
42	4,90	4,70	4,80	7,56	8,57	1,01	143,8	253,1	76,0
43	4,70	4,50	4,60	7,57	8,57	1,00	149,7	245,4	63,9
			4,51			1,02			68,4



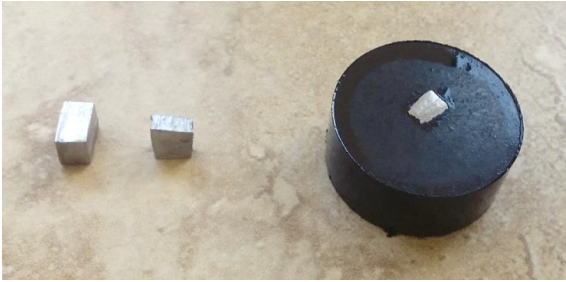



(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO D2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE METALOGRAFÍA



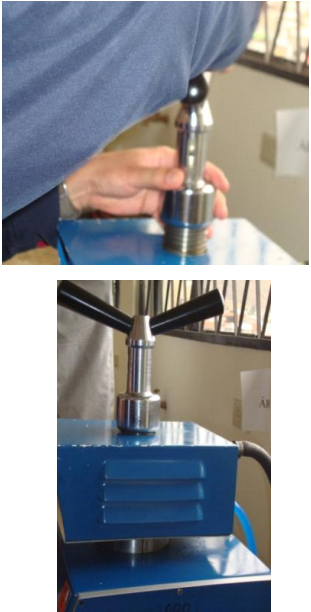
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN DISEÑO MECÁNICO (II COHORTE) LABORATORIO DE INGENIERÍA DE MATERIALES 	
1. DATOS INFORMATIVOS:	
Realizado por:	Ing. Jorge Alexandro Paredes Zumbana
Dirigido por:	Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg.
Fecha ensayo:	16/06/2017
Lugar:	Laboratorio de materiales Facultad Ingeniería Civil y Mecánica
Fecha entrega:	16/06/2017
Normas referencia:	ASTM E 112-96 / ASM
2. TEMA:	
"PREPARACIÓN, OBTENCION DE IMÁGENES Y ANÁLISIS DE MUESTRAS METALOGRAFICAS DE ACERO AISI 1045"	
3. OBJETIVOS:	
Objetivo General:	Identificar la microestructura presente en la muestra de acero AISI 1045 de un virador de molino de caña, mediante la utilización de un microscopio óptico para predecir algunas de las propiedades mecánicas.
Objetivos específicos:	• Conocer detalladamente el procedimiento para la obtención de la probeta metalográfica
	• Atacar químicamente con el reactivo adecuado la probeta de acero AISI 1045 para revelar los detalles de la microestructura.
	• Analizar la microestructura del material en el software, para determinar el porcentaje de Carbono que posee de acuerdo al contenido de ferrita y perlita
	• Determinar el tamaño de grano de la muestra
	• Predecir ciertas propiedades mecánicas del material de acuerdo al porcentaje de Carbono encontrado como son la dureza y la resistencia a la tracción
4. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES:	
4.1 Equipos:	
	<p><i>Características:</i> Alimentación 110V Manómetro 0-300 Bar Temporizador 0-15 min Refrigeración por agua</p>
	
	<p><i>Características: giro aproximado 150 RPM</i></p>
	
Fig. 1 Prensa hidráulica para probetas metalográficas	Fig.2 Banco de lijas 240, 320, 400, 600 y 1500 granos por pulgada
Fig. 3 Pulidora con discos de paño	Fig. 4 Secadora de probetas

(Fuente: Autor: Jorge Paredes)

ANEXO D2 (Continuación)

 <p>Lentes: 40X 100X 200X</p>	
<p>Fig.5 Microscopio con cámara (circuito cerrado)</p>	<p>Fig. 6 Computador para visualizar resultados</p>
<p>4.2 Materiales y reactivos:</p>	
	
<p>Fig.7 Muestra de acero AISI 1045</p>	
	
<p>Fig.8 Baquelita</p>	<p>Fig.9 Alúmina 1 micra en suspensión en agua</p>
	
<p>Fig.10 Reactivo Nital 2 para medio/alto %C</p>	




ANEXO D2 (Continuación)

6. PROCEDIMIENTO:	
	<p>Se procede a cortar las muestras de acero, tomando en cuenta que el corte es con sierra manual, debido a que, al realizarlo en alguna máquina (amoladora, torno, etc.), genera una temperatura de trabajo, y posterior al enfriamiento ambiente, producirá un tratamiento térmico inesperado, para nuestro objetivo.</p>
<p>Fig.11 Corte de muestras de aceros</p>	
	<p>Se selecciona la mejor cara plana de la muestra de acero y se la monta o compacta en baquelita, para facilitar la manipulación y observación; en este punto, se añade un poco de aceite para evitar que la baquelita se pegue a las paredes del cilindro molde.</p>
<p>Fig.12 Montaje de la muestra en la prensa hidráulica</p>	
	<p>Se aprieta el tornillo que sella la cámara de compresión y con esto se esta limitando la carrera del pistón, para que la baquelita quede compacta al solidificarse.</p>
<p>Fig.13 Sellado de cámara de compresión</p>	


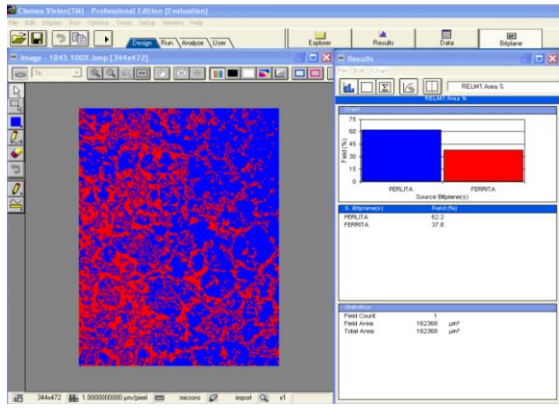

ANEXO D2 (Continuación)

	<p>Se regula el temporizador a 5 min, tiempo que dura la compactación de la baquelita, y se aplica presión hasta controlar en la carátula del manómetro una presión entre 150-200 bares; en el transcurso de este tiempo, la presión va descendiendo, para lo cual se sigue presionando para mantenerlo en ese rango.</p>
<p>Fig.14 Aplicación de presión</p>	
	<p>Con la probeta montada en baquelita, se procede a lijar las superficies en el banco de lijas, realizándolo en un sólo sentido sin girar la probeta, el giro se lo realiza a 90° después de 3 min de haber permanecido en el un sentido. El uso de las lijas es secuencial, pasamos en este desbaste fino desde la lija #240-320-400-600-1500 granos por pulgada. En este proceso se retira las impurezas de la superficie provocadas por el corte del material. El banco de lijas es refrigerado por agua, para evitar que la temperatura suba en el proceso.</p>
<p>Fig.15 Preparación de superficie de la probeta en banco de lijas</p>	
	<p>Mediante el uso de la máquina pulidora con discos de paño, se procede al pulido para conseguir que la superficie quede plana y brillante tipo espejo; se utiliza como refrigerante alúmina en suspensión de agua.</p>
<p>Fig.16 Pulido de la probeta en el paño</p>	

ANEXO D2 (Continuación)

	<p>Se ataca químicamente la probeta, considerando que quedó perfectamente pulida. Se utiliza en reactivo Nital 2. Este ataque químico es inmediato, dura aproximadamente 5 seg, trascurrido ese tiempo se moja la probeta en agua para evitar que se quemé.</p>
<p>Fig.17 Ataque químico de la probeta</p>	
	<p>Se utiliza un ventilador para secar el residuo de agua que quedó después del ataque químico</p>
<p>Fig.18 Secado de la probeta</p>	
	<p>Se coloca la probeta en el microscopio y se procede a analizarla, mediante el uso de un PC, software adecuado y la cámara instalada en el microscopio, que permite capturar las imágenes, inspeccionarlas por circuito cerrado en una TV y grabar las imágenes que se necesite. En el microscopio se usa los lentes 40X, 100X y 200X, de acuerdo a la necesidad. Los resultados obtenidos permitirán proceder con los cálculos que se necesitan.</p>
<p>Fig.19 Análisis de probetas en el microscopio</p>	

ANEXO D2 (Continuación)

ACERO AISI 1045							
							
Fig.20 Microestructura acero AISI 1045, a 100X y ataque 5s	Fig.21 Microestructura acero AISI 1045, en software de análisis						
Componentes:	Ferrita:						
	37,80%						
	Perlita:						
	62,20%						
<table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th>Source Bitplane(s)</th> <th>Field (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PERLITA</td> <td>62.2</td> </tr> <tr> <td>FERRITA</td> <td>37.8</td> </tr> </tbody> </table>	Source Bitplane(s)	Field (%)	PERLITA	62.2	FERRITA	37.8	<p>Cálculo del porcentaje de carbono</p> $\%C = \frac{37.8 \times 0.80}{100} = 0.478$ <p>Cálculo de dureza</p> $HB = \%P(HB\ perlita) + \%F(HB\ ferrita)$ <p>HB perlita = 240 HB ferrita = 90</p> <p style="text-align: center;">HB = 183,3</p>
Source Bitplane(s)	Field (%)						
PERLITA	62.2						
FERRITA	37.8						
Fig.22 Porcentajes de ferrita/perlita obtenidos en el software							
Cálculo de la resistencia última a la tracción	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON NORMAS						
$\sigma_u = 500 HB \quad (PSI)$ <p>$\sigma_u = 91650 \quad PSI$</p>	<p>% de carbono calculado = 0,478</p> <p>% C según ASM = 0,43 - 0,50</p>						
Cálculo tamaño de grano	<p>Dureza HB calculada = 183,3</p> <p>Dureza según ASM = 163/170 HB</p> <p>Dureza según Bohman = 220-235 HB</p>						
Método: ASTM E112-96	<p>Resistencia tracción σ_u calculado (psi)= 91650</p> <p>Resistencia tracción ASM (psi) = 82000-85000</p> <p>Resistencia tracción Bohman (psi) = 92258</p>						
Método estadístico							
 <p style="margin-left: 20px;"> $\bar{x} = \frac{\sum X_i}{n}$ $d = \frac{\text{Longitud de línea referencial } (\mu m)}{\bar{x}}$ </p>							

ANEXO D2 (Continuación)

$$\bar{x} = \frac{17 + 16 + 18 + 19 + 17 + 18 + 16 + 18 + 17 + 16 + 18 + 18 + 19}{13} = 17,46$$

Para la longitud de la línea referencial (5.41 cm), se tiene las siguientes conversiones:

1 cm = 37,795276 pixel

Para 100X, 1 pixel = 3,5 μm


$$\bar{d} = \frac{5,41\text{cm} * \frac{37,795276 \text{ pixel}}{1 \text{ cm}} * \frac{3,5 \mu\text{m}}{1 \text{ pixel}}}{17,46}$$


$$\bar{d} = \frac{715,65 \mu\text{m}}{17,46} = 40,99 \mu\text{m} \approx 41 \mu\text{m}$$


El Anexo A3, en la Tabla 4 de la ASTM E-112 para $\bar{d} = 41 \mu\text{m}$, el índice de grano ASTM está entre 6.0 y 6.5

ANEXO D3

PROCEDIMIENTO DE BLINDAJE DE DIENTES EN VIRADORES

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
Nº: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>1. OBJETIVO</p> <p>Establecer la metodología y describir las actividades y requerimientos para el blindaje de los flancos de los dientes de viradores de molinos de caña de acero AISI 1045, conforme a la tecnología y material de recubrimiento disponibles en el medio de tal forma de obtener las mejores propiedades mecánicas y garantizar la vida útil del virador evitando su deterioro en el transcurso del proceso productivo.</p> <p>2. ALCANCE</p> <p>Este procedimiento es de aplicación general y obligatoria, en forma parcial o global para todo el personal y trabajos que se ejecuten en relación al proceso de blindaje de los flancos de los dientes del virador de molino de caña, fabricado por fundición en colada de acero AISI 1045.</p> <p>3. ESTÁNDARES Y NORMAS</p> <p>Dentro del proceso propuesto se debe cumplir con los siguientes estándares</p> <ol style="list-style-type: none">NACE Standard RP0287-2002 Medición de la rugosidad de la superficie de acero limpiado a presión con abrasivoASTM A370 Definiciones y Métodos de Prueba para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero.ASTM D4417-B: Métodos de Prueba para Medir el Perfil de la Superficie de Acero Limpiado a Presión con Abrasivo		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
Nº: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>d. ASTM E797: Práctica Estándar para Medir el Espesor mediante el Método de Contacto de Eco de Pulso Ultrasónico Manual</p> <p>4. GENERALIDADES</p> <p>Los fenómenos que determinan el deterioro de un virador de un molino de caña, son por desgaste abrasivo y corrosivo; esto se debe al entorno agresivo al que están expuestos en el proceso operativo. Los factores de degradación vienen desde los campos de cultivo, sean estos: la arena de sílice que contiene el terreno, raíces y cogollos provenientes de las plantas de caña, piedras, palos y pedazos metálicos, que vienen junto con la caña y además el efecto químico que tiene el jugo de caña en el material metálico, en donde, debido a su bajo pH (4.5-5) es promotor del proceso de corrosión y pérdida de material.</p> <p>El blindaje de los flancos de dientes de los viradores de los molinos de caña, consiste en la aplicación de un recubrimiento de aleación metálica, que garantice una mayor dureza superficial y resistencia a la corrosión en relación a la del material base. Esto permitirá que el material base sufra el menor deterioro posible y que en su lugar sea el material de recubrimiento quien se convierta en el esclavo de sacrificio ante el desgaste abrasivo y corrosivo, de tal manera que los mantenimientos en este elemento sean en la menor cantidad posible.</p> <p>5. DEFINICIONES Y NOMENCLATURA</p> <p>Los términos afines al virador de un molino de caña se detallan a continuación:</p> <p>a. Molino de caña: conjunto de mecanismos mecánicos giratorios que permiten la extracción por compresión del jugo a partir de la caña de azúcar.</p>		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
Nº: PRO-ENER-01		Revisión: Original

- b. Masa o rodillo: elemento macizo fabricado de acero que en su envolvente lleva una superficie acanalada que permite direccionar el jugo extraído por compresión. La compresión de la caña la generan tres o cuatro masas.
- c. Virador: elemento de acero que por medio de su parte dentada permite desprender la caña desfibrada de las acanaladuras de la masa, para dirigirlas hacia la salida del molino y aprovechar al máximo la extracción del jugo.
- d. Flancos de dientes: son los lados, izquierdo y derecho de cada diente del virador, quienes sufren el mayor desgaste por abrasión, por encontrarse direccionado hacia las acanaladuras de la masa.

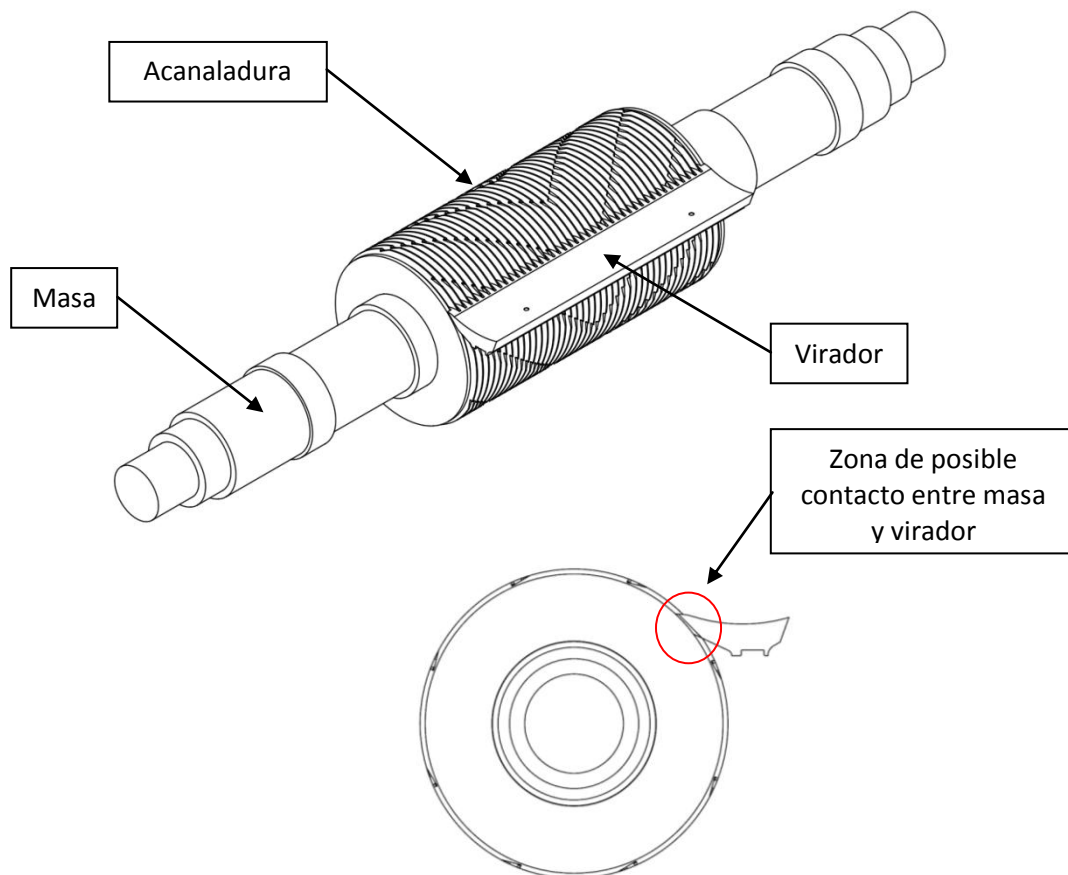






Ilustración 1. Descripción de partes del molino de caña

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>6. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Especificaciones del acero AISI 1045, composición y propiedades mecánicas • Planos de diseño • Planos de montaje • Historial de reparaciones anteriores <p>7. PROCEDIMIENTO</p> <p>Para blindar los flancos de los dientes del virador de molino de caña se inicia con una inspección visual de campo o de la información técnica que se encuentre disponible, para con ello realizar la evaluación inicial y determinar si es factible de ejecutar.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Levantamiento dimensional e inspección visual para verificar la compatibilidad del virador fabricado de fundición en colada de acero, ó si se trata de recuperar un virador usado, se hará uso de ensayos no destructivos para cuantificar el desgaste e identificar defectos superficiales. • Evaluar el estado de la pieza en relación al acabado superficial. • Verificar la factibilidad de realizar el blindaje. • Definir la metodología del blindaje. • Evaluar la cantidad de material de aporte, equipos y suministros. • Elaborar una cotización y cronograma de trabajo <p>A continuación sigue el procedimiento de blindaje de los flancos de los dientes del virador del molino de caña:</p>		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>7.1. LIMPIEZA</p> <p>Esta actividad es de vital importancia con la finalidad de conseguir una superficie libre de suciedades y elementos extraños sobre el material base, que puedan interferir en el proceso de blindaje.</p> <p>7.1.1. Operaciones</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Recibir el virador de la fundidora b. Verificar medidas y tolerancias de acuerdo al plano de fabricación c. Solicitar a la fundidora los certificados de ensayos de radiografía y ultrasonido que garanticen que la pieza se encuentra libre de porosidad y grietas d. Posicionar la pieza en un soporte con anclaje e. Remover grasa y lubricantes de la superficie utilizando desengrasante f. Retirar de la superficie posibles restos de materiales producto de la fundición <p>7.1.2. Equipos y herramientas</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Puente grúa y elementos de izado b. Banco de apoyo empotrado c. Amoladora, cincel y martillo <p>7.1.3. Recurso Humano</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Un mecánico pulidor 		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>7.1.4. Medidas de seguridad</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Utilizar equipos de protección personal. b. Delimitar la zona de trabajo. c. Verificar el estado de cadenas, cabos, cables, ganchos y poleas del puente grúa previo al movimiento de la pieza. <p>7.2. INSPECCIÓN Y CONTROL INICIAL</p> <p>Se realiza una inspección y control minucioso para evaluar el estado inicial del virador, si es un virador usado de operaciones pasadas, deberán utilizarse técnicas de metrología y ensayos no destructivos para evaluar y caracterizar el desgaste producido en los flancos de los dientes; y si el virador es nuevo se utilizarán técnicas de limpieza y preparación de superficies apoyadas con técnicas de metrología para lograr el anclaje adecuado del blindaje.</p> <p>7.2.1. Operaciones</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Ubicar el virador en un soporte que se encuentre anclado b. Registrar los datos informativos del virador: tipo, fabricante, propietario, fecha, número de dientes, paso entre dientes, material. c. Si se trata de un virador usado, se debe inspeccionar y marcar los daños más relevantes en los flancos de los dientes, con esto se podrá definir si los dientes del virador son recuperables o es necesario la fabricación de uno nuevo: <ul style="list-style-type: none"> • Dientes despostillados • Dientes removidos por completo • Desgaste en los flancos de los dientes 		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original

- d. Si el virador usado es apto para recuperación, es necesario identificar y evaluar los defectos superficiales según las normas que rigen el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes (ANSI/ASTM E-165, ASNT SNT TC-1A)





Ilustración 2. Ensayo por líquidos penetrantes en dientes del virador

- e. Si el virador es nuevo se debe medir la dureza de los dientes
- f. Medir el espesor en un punto específico de los dientes
- g. Realizar la limpieza de los dientes del virador con un producto desengrasante
- h. Comprobar las dimensiones del virador, según el plano entregado a la fundidora para garantizar que no exista interferencia con la masa en el momento del montaje.
- i. Modelar en CAD el virador y la superficie del blindaje en los dientes
- j. Registrar observaciones relevantes y registro fotográfico

7.2.2. Equipos y herramientas

- a. Kit de líquidos penetrantes si es el caso de un virador usado para recuperar

<p align="center">JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE</p>	<p align="center">PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA</p>	 <p align="center">INGENIO SAN JUAN</p>
<p>TIPO: Procedimiento</p>		<p>Fecha emisión: 28/08/2017</p>
<p>N°: PRO-ENER-01</p>		<p>Revisión: Original</p>
<p>b. Durómetro portátil</p> <p>c. Medidor de espesores por ultrasonido</p> <p>d. Cámara fotográfica</p> <p>e. Soporte anclado al piso</p> <p>7.2.3. Recurso Humano</p> <p>a. Especialista ensayos no destructivos (líquidos penetrantes)</p> <p>b. Especialista de ingeniería y metrología</p> <p>7.2.4. Medidas de seguridad</p> <p>a. Utilizar equipos de protección personal</p> <p>b. Delimitar la zona de trabajo</p> <p>c. Soportar la pieza en un banco anclado</p> <p>7.3. PREPARACIÓN SUPERFICIAL</p> <p>Este proceso se encargará de obtener la rugosidad adecuada en la superficie de los dientes para que el blindaje metálico se adhiera sin problema; se lo realiza por soplado a presión de un material abrasivo (sandblasting).</p> <p>7.3.1. Operaciones</p> <p>a. Ubicar el virador sobre el soporte anclado</p> <p>b. Realizar el sandblasting de manera uniforme en la superficie de los dientes</p> <p>c. Medir el perfil de anclaje o rugosidad de los dientes según la NACE N° 1/SSPC-SP 5</p>		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
Nº: PRO-ENER-01		Revisión: Original



Number		Microscope Readings			Replica Tape Readings		
		Avg.	95% Confidence Limits ^(B)		Avg.	95% Confidence Limits ^(B)	
			Low	High		Low	High
1.	S230 NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.72	2.41	3.03	2.79	2.57	3.00
2.	S230 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.02	1.54	2.49	2.36	2.28	2.43
3.	S390 NACE No. 1/SSPC-SP 5	4.05	3.47	4.63	4.17	4.01	4.33
4.	S390 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.38	3.33	3.76	3.44	40.8
5.	GL-50 NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.31	2.15	2.48	2.39	2.06	2.71
6.	GL-50 NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.00	1.81	2.19	2.39	2.22	2.55
7.	GL-25 NACE No. 1/SSPC-SP 5	3.94	3.41	4.47	4.10	3.85	4.35
8.	GL-25 NACE No. 3/SSPC-SP 6	3.46	2.88	4.04	3.71	3.32	4.10
9.	BB4016 NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.14	1.93	2.35	2.24	1.71	2.78
10.	BB4016 NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.87	1.74	1.99	2.24	2.05	2.43
11.	16/40 Sand NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.22	2.04	2.41	1.93	1.74	2.18
12.	16/40 Sand NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.89	1.72	2.05	1.90	1.72	2.08
13.	12/20 Al ₂ O ₃ NACE No. 2/SSPC-SP 10	3.18	2.93	3.44	2.79	2.69	2.88
14.	12/30 Al ₂ O ₃ NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.59	3.11	2.73	2.58	2.88


Ilustración 3. Preparación superficial de los dientes del virador según normas NACE

7.3.2. Equipos y herramientas

- a. Soportes con anclaje
- b. Equipo de sandblasting incluido compresor de aire
- c. Medidor de rugosidad

7.3.3. Recurso humano

- a. Especialista en proceso de sandblasting
- b. Especialista en ingeniería y metrología

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original

7.3.4. Medidas de seguridad

- a. Utilizar equipos de protección personal
- b. Delimitar la zona de trabajo
- c. Soportar la pieza en un banco anclado

7.4. BLINDAJE POR PROYECCIÓN TÉRMICA

Los dientes del virador del molino de caña reciben el blindaje por medio del proceso de proyección térmica por llama y con el uso de la aleación metálica micropulverizada EUTALLOY 11496; el espesor de blindaje óptimo permitirá la durabilidad del material base de los dientes del virador. El espesor de blindaje óptimo que debe aplicarse es 1.3 mm, este valor se ha obtenido modelando el virador y el espesor de blindaje, con la finalidad de obtener su masa (peso); este valor junto a los valores de pérdida de masa obtenidos en la experimentación de muestras de acero AISI 1045 en el ensayo de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 durante 11 minutos de duración, permitió establecer que para una vida útil deseada de aproximadamente 240 días el espesor óptimo de blindaje debe ser de 1.3 mm.

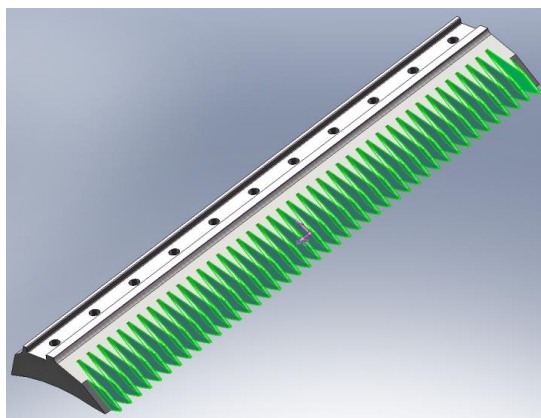


Ilustración 4. Modelado del virador y el espesor de blindaje


JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original

Tabla 1. Resultados del modelado del espesor de blindaje y pérdida de masa durante 11 min de duración del ensayo de desgaste por abrasión según la ASTM G65

Espesor de blindaje (mm)	Tiempo ensayo (min)	Masa ataque (g)	Peso perdido (g)	Vida útil blindaje (días)
0,50	11,0	1191,19	0,0928	98,05
0,60	11,0	1415,27	0,0928	116,50
0,70	11,0	1639,89	0,0928	134,99
0,80	11,0	1865,03	0,0928	153,52
0,90	11,0	2090,69	0,0928	172,10
1,00	11,0	2316,88	0,0928	190,72
1,10	11,0	2543,60	0,0928	209,38
1,20	11,0	2770,84	0,0928	228,08
1,30	11,0	2998,60	0,0928	246,83

Los resultados de la Tabla 1, se obtuvieron a partir de la ecuación siguiente:

$$V_{util} = \frac{\text{Masa del perfil de ataque} * \text{tiempo ensayo al desgaste de las probetas}}{\text{peso perdido de las probetas ensayadas}}$$

7.4.1. Operaciones

- a. Ajustar las presiones de los gases de la proyección térmica de acuerdo a la boquilla B3S que sirve para realizar flujos de carácter intermedio, sean éstas presiones 37 psi para el oxígeno y 9 psi para el acetileno.
- b. Precalentar la superficie de los dientes con una temperatura entre 320 y 420°C, este rango de temperatura permitirá que la aleación metálica se funda y se adhiera perfectamente al material base.
- c. Realizar la proyección térmica por llama


JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original



Ilustración 5. Blindaje por proyección térmica de los dientes del virador

7.4.2. Equipos y herramientas


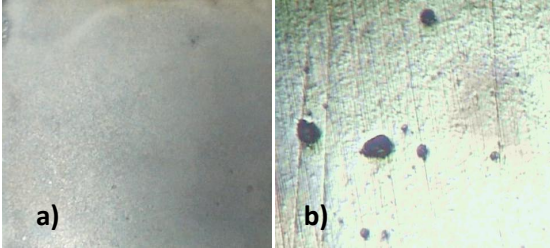
- a. Soporte anclado
- b. Pirómetro
- c. Envases industriales de oxígeno y acetileno
- d. Reguladores de presión de oxígeno y acetileno
- e. Equipo de proyección térmica (incluido aleación metálica micropulverizada)


7.4.3. Recurso Humano

- a. Especialista en recubrimientos por proyección térmica
- b. Especialista en control de calidad
- c. Especialista en ingeniería y metrología

7.4.4. Medidas de seguridad

- a. Utilizar equipos de protección personal

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
Nº: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>b. Limitar y señalizar el área de trabajo</p> <p>c. Soportar la pieza bien anclada</p> <p>d. Usar equipos de ventilación</p> <p>7.5. INPECCIÓN Y CONTROL FINAL</p> <p>La validación del procedimiento se realiza a través de la inspección y control final para evaluar la calidad del blindaje de los flancos de los dientes, mediante la aplicación de técnicas de metrología e inspección microscópica.</p> <p>7.5.1. Operaciones</p> <p>a. Ubicar el virador en los soportes anclados</p> <p>b. Medición del espesor de blindaje</p> <p>c. Medición de la dureza del blindaje</p> <p>d. Inspeccionar visualmente las superficies de los dientes y verificar el acabado del blindaje.</p> <p>e. Verificar la calidad del blindaje según los criterios de los ensayos microscópicos realizados en el blindaje de muestras de acero AISI 1045</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Ilustración 6. a) Blindaje a simple vista, b) Blindaje con inspección microscópica a 100X, se presencia porosidad</p>		

JEFATURA DE PROYECTOS DISEÑO CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	PROCEDIMIENTO PARA EL BLINDAJE DE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE VIRADORES DE ACERO AISI 1045 DE LOS MOLINOS DE CAÑA	 INGENIO SAN JUAN
TIPO: Procedimiento		Fecha emisión: 28/08/2017
N°: PRO-ENER-01		Revisión: Original
<p>7.5.2. Equipos y herramientas</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Medidor de espesor por ultrasonido b. Durómetro portátil c. Lupa para inspección visual d. Cámara fotográfica <p>7.5.3. Recurso Humano</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Especialista de control de calidad b. Especialista de ingeniería y metrología <p>7.5.4. Medidas de seguridad</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Utilizar equipos de seguridad personal b. Delimitar la zona de trabajo c. Sujetar la pieza en el soporte anclado <p>8. DOCUMENTOS DE REFERENCIA</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Registro de resultados en el ensayo de desgaste por abrasión del blindaje según la ASTM G65, en muestras de acero AISI 1045 b. Registro fotográfico microscópico del blindaje realiza en muestras de acero AISI 1045 		

ANEXO E: TABLAS DE CONVERSIÓN

ANEXO E1

TABLAS DE CONVERSIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Microns	Inches	Mesh per inch			Microns	Inches	Mesh per inch			Microns	Inches	Mesh per inch		
		US*	Tyler	BS*			US*	Tyler	BS*			US*	Tyler	BS*
1		12500 (theoretical)			76	0.003	200			315	0.0124			
2		6250 (theoretical)			80	0.0032				350	0.0139	45	42	44
5		2500 (theoretical)			90	0.0035	170	170	170	400	0.0158			
10		1250 (theoretical)			106	0.0041	140	150	150	417	0.0164	35		
15		800 (theoretical)			125	0.0049	120	115	120	420	0.0165	48		
20		625 (theoretical)			147	0.0058	100			495	0.0195	32		
25		500 (theoretical)			152	0.006		100		500	0.0197	35		30
33	0.0013	(425)			160	0.0063				600	0.0234	30	28	25
38	0.0015	400			175	0.0069	80			630	0.0248			
41	0.0016				180	0.007	80		85	699	0.0275		22	
45	0.0017	325	(325)		200	0.0079				701	0.0276	24		
50	0.002				208	0.0082	65			710	0.0278	25		
53	0.0021	270	(270)	(300)	212	0.0083	70		72	800	0.0315			
56	0.0022				246	0.0097	60			833	0.0328	20		
63	0.0025	230	(250)		250	0.0098	60			850	0.0331	20		
66	0.0026	240			251	0.0099		60		853	0.0336		18	
71	0.0028				259	0.0116	48	52		991	0.039	16		
75	0.0029	200	200		300	0.0117	50			1000	0.0394	18		

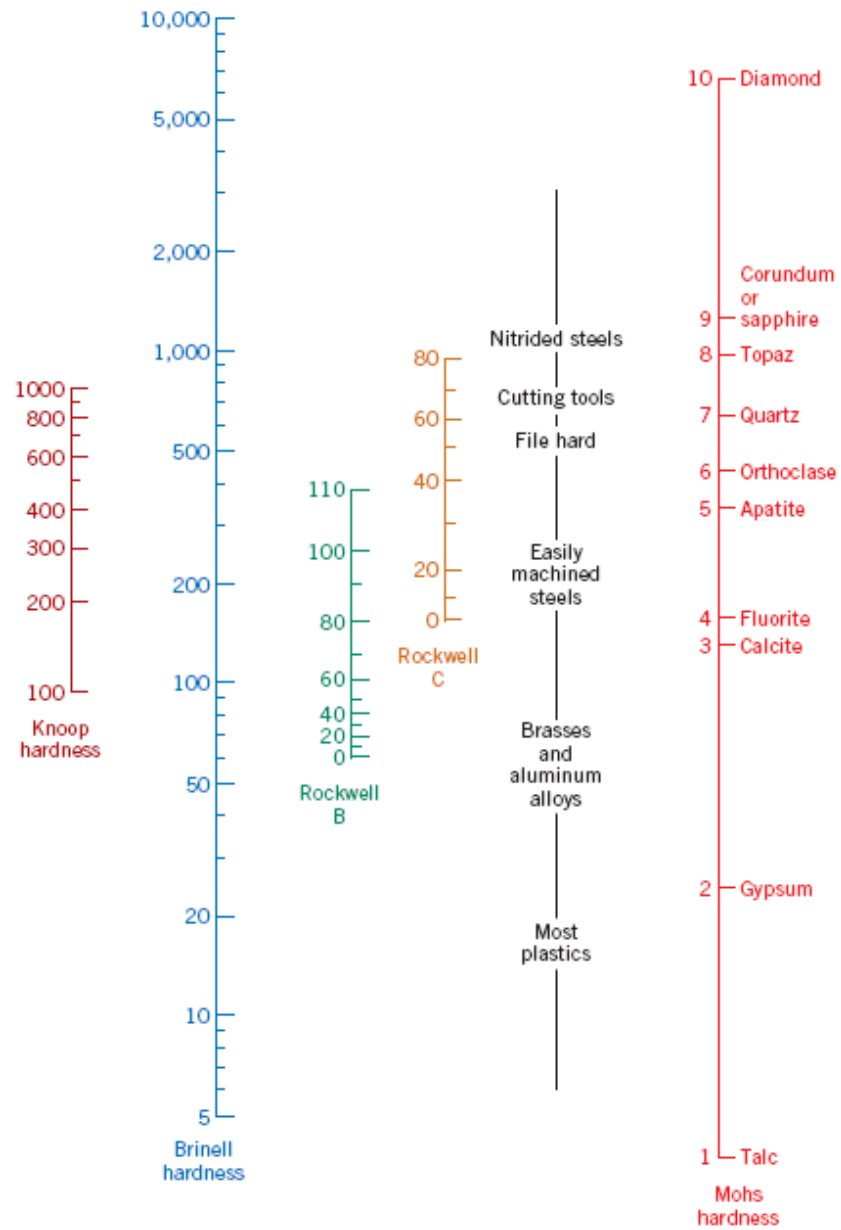
(Fuente: Thermal Spray Coating Catalogue – Castolin Eutectic)

Standard	Sieve Designation Alternative	Nominal Sieve Opening, in. (3)	Permissible Variation in Openings (4)	Opening Dimension not more than 5% of the Openings (5)	Maximum Individual Opening (6)	Nominal Wire Diameter, mm (7)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
125 mm	5 in.	5	± 3.66 mm	130.00 mm	130.9 mm	8.00
106 mm	4.24 in.	4.24	± 3.12 mm	110.2 mm	111.1 mm	6.30
100 mm	4 in.	4	± 2.94 mm	104.0 mm	104.8 mm	6.30
90 mm	3-1/2 in.	3.5	± 2.70 mm	93.6 mm	94.4 mm	6.30
75 mm	3 in.	3	± 2.20 mm	78.1 mm	78.7 mm	6.30
63 mm	2-1/2 in.	2.5	± 1.90 mm	65.6 mm	66.2 mm	5.60
53 mm	2.12 in.	2.12	± 1.60 mm	55.2 mm	55.7 mm	5.00
50 mm	2 in.	2	± 1.50 mm	52.1 mm	52.6 mm	5.00
45 mm	1-3/4 in.	1.75	± 1.40 mm	46.9 mm	47.4 mm	4.50
37.5 mm	1-1/2 in.	1.5	± 1.10 mm	39.1 mm	39.5 mm	4.50
31.5 mm	1-1/4 in.	1.25	± 1.00 mm	32.9 mm	33.2 mm	4.00
26.5 mm	1.06 in.	1.06	± .800 mm	27.7 mm	28.0 mm	3.55
25.0 mm	1.00 in.	1	± .800 mm	26.1 mm	26.4 mm	3.55
22.4 mm	7/8 in.	0.875	± .700 mm	23.4 mm	23.7 mm	3.55
19.0 mm	3/4 in.	0.750	± .600 mm	19.9 mm	20.1 mm	3.15
16.0 mm	5/8 in.	0.625	± .500 mm	16.7 mm	17.0 mm	3.15
13.2 mm	0.530 in.	0.530	± .410 mm	13.83 mm	14.05 mm	2.80
12.5 mm	1/2 in.	0.500	± .390 mm	13.10 mm	13.31 mm	2.50
11.2 mm	7/16 in.	0.438	± .350 mm	11.75 mm	11.94 mm	2.50
9.5 mm	3/8 in.	0.375	± .300 mm	9.57 mm	10.16 mm	2.24
8.0 mm	5/16 in.	0.312	± .250 mm	8.41 mm	8.58 mm	2.00
6.7 mm	0.265 in.	0.265	± .210 mm	7.05 mm	7.20 mm	1.80
6.3 mm	1/4 in.	0.250	± .200 mm	6.64 mm	6.78 mm	1.80
5.6 mm	No. 3-1/2 (E)	0.223	± .180 mm	5.90 mm	6.04 mm	1.60
4.75 mm	No. 4	0.187	± .150 mm	5.02 mm	5.14 mm	1.60
4.00 mm	No. 5	0.157	± .130 mm	4.23 mm	4.35 mm	1.40
3.35 mm	No. 6	0.132	± .110 mm	3.55 mm	3.66 mm	1.25
2.80 mm	No. 7	0.110	± .095 mm	2.975 mm	3.070 mm	1.12
2.36 mm	No. 8	0.0937	± .080 mm	2.515 mm	2.600 mm	1.00
2.00 mm	No. 10	0.0787	± .070 mm	2.135 mm	2.215 mm	0.900
1.7 mm	No. 12	0.0661	± .060 mm	1.820 mm	1.890 mm	0.800
1.4 mm	No. 14	0.0555	± .050 mm	1.505 mm	1.565 mm	0.710
1.18 mm	No. 16	0.0469	± .045 mm	1.270 mm	1.330 mm	0.630
1.00 mm	No. 18	0.0394	± .040 mm	1.080 mm	1.135 mm	0.560
850 µmF	No. 20	0.0331	± .35 µm	925 µm	970 µm	0.500
710 µm	No. 25	0.0278	± .30 µm	775 µm	815 µm	0.450
600 µm	No. 30	0.0234	± .25 µm	660 µm	695 µm	0.400
500 µm	No. 35	0.0197	± .20 µm	550 µm	585 µm	0.315
425 µm	No. 40	0.0165	± .19 µm	471 µm	502 µm	0.280
355 µm	No. 45	0.0139	± .16 µm	396 µm	426 µm	0.224
300 µm	No. 50	0.0117	± .14 µm	337 µm	363 µm	0.200
250 µm	No. 60	0.0098	± .12 µm	283 µm	306 µm	0.160
212 µm	No. 70	0.0083	± .10 µm	242 µm	263 µm	0.140

(Fuente: Product Catalog WS TYLER)

ANEXO E2

COMPARACIÓN DE LAS VARIAS ESCALAS DE DUREZA



(Fuente: Material Science and Engineering – CALLISTER, W)

ANEXO E3

TABLA DE CONVERSIÓN DE DUREZAS ACORDE A LA DIN 50150

Tensile strength [MPa]	Hardness in accordance with			Tensile strength [MPa]	Hardness in accordance with			Tensile strength [MPa]	Hardness in accordance with		
	Vickers [HV]	Brinell [HB]	Rockwell [HRC]		Vickers [HV]	Brinell [HB]	Rockwell [HRC]		Vickers [HV]	Brinell [HB]	Rockwell [HRC]
320	100	95		800	250	238	22.2	1630	500	(476)	49.8
335	105	100		820	255	242	23.1	1665	510	(485)	50.5
350	110	105		835	260	247	24.0	1700	520	(494)	51.1
370	115	109		850	265	252	24.8	1740	530	(504)	51.7
385	120	115		865	270	257	25.6	1775	540	(513)	52.3
400	125	119		880	275	261	26.4	1810	550	(523)	53.0
415	130	124		900	280	266	27.1	1845	560	(532)	53.6
430	135	128		915	285	271	27.8	1880	570	(542)	54.1
450	140	133		930	290	276	28.5	1920	580	(551)	54.7
465	145	138		950	295	280	29.2	1955	590	(561)	55.2
480	150	143		965	300	285	29.8	1995	600	(570)	55.7
495	155	147		995	310	295	31.0	2030	610	(580)	56.3
510	160	152		1030	320	304	32.2	2070	620	(589)	56.8
530	165	156		1060	330	314	33.3	2105	630	(599)	57.3
545	170	162		1095	340	323	33.4	2145	640	(608)	57.8
560	175	166		1125	350	333	35.5	2180	650	(618)	57.8
575	180	171		1155	360	342	36.6		660		58.3
595	185	176		1190	370	352	37.7		670		58.8
610	190	181		1220	380	361	38.8		680		59.2
625	195	185		1255	390	371	39.8		690		59.7
640	200	190		1290	400	380	40.8		700		60.1
660	205	195		1320	410	390	41.8		720		61.0
675	210	199		1350	420	399	42.7		740		61.8
690	215	204		1385	430	409	43.6		760		62.5
705	220	209		1420	440	418	44.5		780		63.3
720	225	214		1455	450	428	45.3		800		64.0
740	230	219		1485	460	437	46.1		820		64.7
755	235	223		1520	470	447	47.7		840		65.3
770	240	228	20.3	1550	480	(456)	48.4				
785	245	233	21.3	1595	490	(466)	49.1				

(Fuente: Thermal Spray Coating Catalogue – Castolin Eutectic)

ANEXO F: TABLAS DESCRIPTIVAS

ANEXO F1

SERIE GALVÁNICA DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES

Table 1 Galvanic series in seawater at 25 °C (77 °F)

Corroded end (anodic, or least noble)

Magnesium
Magnesium alloys
Zinc
Galvanized steel or galvanized wrought iron
Aluminum alloys 5052, 3004, 3003, 1100, 6053, in this order
Cadmium
Aluminum alloys 2117, 2017, 2024, in this order
Low-carbon steel
Wrought iron
Cast iron
Ni-Resist (high-nickel cast iron)
Type 410 stainless steel (active)
50-50 lead-tin solder
Type 304 stainless steel (active)
Type 316 stainless steel (active)
Lead
Tin
Copper alloy C28000 (Muntz metal, 60% Cu)
Copper alloy C67500 (manganese bronze A)
Copper alloys C46400, C46500, C46600, C46700 (naval brass)
Nickel 200 (active)
Inconel alloy 600 (active)
Hastelloy alloy B
Chlorimet 2
Copper alloy C27000 (yellow brass, 65% Cu)
Copper alloys C44300, C44400, C44500 (admiralty brass)
Copper alloys C60800, C61400 (aluminum bronze)
Copper alloy C23000 (red brass, 85% Cu)
Copper C11000 (ETP copper)
Copper alloys C65100, C65500 (silicon bronze)
Copper alloy C71500 (copper nickel, 30% Ni)
Copper alloy C92300, cast (lead-tin bronze G)
Copper alloy C92200, cast (lead-tin bronze M)
Nickel 200 (passive)
Inconel alloy 600 (passive)
Monel alloy 400
Type 410 stainless steel (passive)
Type 304 stainless steel (passive)
Type 316 stainless steel (passive)
Incoloy alloy 825
Inconel alloy 625
Hastelloy alloy C
Chlorimet 3
Silver
Titanium
Graphite
Gold
Platinum

Protected end (cathodic, or most noble)

(Fuente: Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance - DAVIS, J)

ANEXO F2

ENSAYOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE REVESTIMIENTOS PROTECTORES

Test	Description and remarks
Salt spray (ASTM B 117)	Most widely specified test. Atomized 5% sodium chloride (NaCl), neutral pH, 35 °C (95 °F) (a), follow details of ASTM B 117, Appendix X1. Emphasizes wet surfaces (nondrying), high oxygen availability, neutral pH, and warm conditions. Control of comparative specimens should be run simultaneously. Corrosivity consistency should be checked as described in ASTM B 117, Appendix X3. Notes: May be the most widely misused test. Requires correlation to service tests for useful results. Do not assume correlation exists.
100% relative humidity (ASTM D 2247)	Widely used test. Condensing humidity, 100% RH, 38 °C (100 °F). Emphasizes sensitivity to water exposure
Acetic acid-salt spray ASTM G 85, A1 (formerly ASTM B 287)	Widely used test. Atomized 5% NaCl, pH 3.2 using acetic acid, 35 °C (95 °F). More severe than ASTM B 117. The lower pH and the presence of acetate affect the solubility of corrosion products on and under the protective coatings.
Sulfur dioxide-salt spray (ASTM G 85, A 4)	Atomized 5% NaCl, collected solution pH = 2.5–3.2, 35 °C (95 °F), SO ₂ metered (60 min · 35 cm ³ /min per m ³ cabinet volume) 4 times per day
Copper-accelerated salt spray, or CASS (ASTM B 368)	Atomized 5% NaCl, pH 3.2 with acetic acid, 0.025% cupric chloride-dihydrate, 35 °C (95°F). Galvanic coupling due to copper salt reduction to copper metal. More severe than ASTM B 117
FACT (formerly ASTM B 538)	Testing anodized aluminum specimens. Electrolyte as in salt spray or CASS test. Specimen is made the cathode to generate high pH at defects.
Accelerated weathering	Exposure of coated specimens to effects of ultraviolet radiation experienced in outdoor sunlight conditions, which may be combined with other exposures such as moisture and erosion. Exposure cabinets use carbon arc (ASTM D 822), xenon lamp (ASTM G 26), or fluorescent lamp (ASTM G 53).
Lactic acid	On substrates of brass and copper alloys, determines coatings porosity and resistance to handling (perspiration). Consists of immersion in 85% lactic acid solution, drying, and incubating above acetic acid vapors for 20 h to reveal discoloration spots at failure points or delaminations
Acidified synthetic seawater testing or SWAAT (ASTM G 85, A3; formerly ASTM G 43)	Atomized synthetic seawater (ASTM D 1141) with 10 mL glacial acetic acid per L of solution, pH 2.8 to 3.0, 35 °C (95 °F). More severe than ASTM B 117. The lower pH and the presence of acetate affect the solubility of corrosion products on and under the protective coatings.
Electrographic and chemical porosity tests	Pores and active defects in nonmetallic coatings can be revealed by color indication or deposit formation. On nickel substrates, dimethylglyoxime, or steel, potassium ferricyanide (ferroxyl test) indicator can be applied to surface on filter paper while substrate is made the anode. Alternatively, a substrate immersed in acidic copper sulfate can be made the cathode to form copper nodules at conductive coatings defects.
Adhesion (ASTM D 3359-90)	Knife and fingernail test consists of cutting through the coating with knife or awl and dislodging coating with thumbnail or fingernail (pass/fail). The ASTM D 3359 test consists of "X" scribes or parallel cross-hatches followed by adhesive tape stripping of loosened coating.
T-bend adhesion (ASTM D 4145)	Combined flexibility and adhesion test consists of clamping end of coated flat metal panel in vise or similar tool bending (convex) through 90°, reclamping to bend through 180° to give "0T" bend (where T is panel thickness and the numeral (0, 1, 2,...) is the number of panel thicknesses). Rebending over the 180° bend gives a 1T bend. Adhesive tape is pressed down along edge of bend and any loose coating stripped off.
Scab test	Cyclic testing consisting of short salt exposure, short drying period, and long period of high humidity. Undercutting from scribe is measured.
Exterior exposure (ASTM D 1014)	Method for conducting exterior exposure tests of paints on steel. Well-defined exposure setup, not necessarily equivalent to service tests
Service test data	Performance data of coatings systems under use conditions. Slowest evaluation method; provides tangible results

FACT, Ford anodized aluminum corrosion test. (a) Note that dissolved CO₂ concentration at 0 °C (32 °F) is three times that of concentration at 35 °C (95 °F) and can affect corrosion. Source: Ref 12

(Fuente: Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance - DAVIS, J)

ANEXO F3

ALGUNOS REACTIVOS QUÍMICOS PARA EL ATAQUE “REVELADO” DE MICROESTRUCTURAS

Table 1 Etchants for microscopic examination of carbon and alloy steels

No.	Etchant	Purpose, or characteristic revealed
1	Nital: 1 to 5 mL HNO ₃ in 99 to 95 mL ethanol (95%) or methanol (95%)	Develops ferrite grain boundaries in low-carbon steels; produces contrast between pearlite and a cementite or ferrite network; develops ferrite boundaries in structures consisting of martensite and ferrite; etches chromium-bearing low-alloy steels resistant to action of picral. Preferred for martensitic structures.
2	Picral: 4 g picric acid in 100 mL ethanol (95%) or methanol (95%)	Reveals maximum detail in pearlite, spheroidized carbide structures, and bainite; reveals undissolved carbide particles in martensite; differentiates ferrite, martensite, and massive carbide by coloration; differentiates bainite and fine pearlite; reveals carbide particles in grain boundaries of low-carbon steel. Addition of about 0.5 to 1 mL zephiran chloride wetting agent increases speed of attack.

(Fuente: Metals Handbook Desk Edition - ASM International)

ANEXO G
PAPER

Blindaje por proyección térmica en flancos de dientes de un virador de molino de caña del ingenio azucarero San Juan

Jorge Paredes Zumbana
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
Universidad Técnica de Ambato
Av. Los Chasquis y Río Payamino
Ambato, Ecuador
alexando96@gmail.com

Segundo Espín Lagos
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
Universidad Técnica de Ambato
Av. Los Chasquis y Río Payamino
Ambato, Ecuador
sespin@uta.edu.ec

Resumen En la presente investigación se realizó el blindaje, a los flancos de dientes de un virador de un molino de caña, por medio de la técnica de proyección térmica por llama, mediante el uso de la aleación micropulverizada Eutalloy 11496. El material del virador es de acero AISI 1045 y la superficie de blindaje fue preparada por el proceso de sandblasting, mediante el uso de material abrasivo de naturaleza volcánica, con el objetivo de conseguir una superficie óptima de anclaje para la aleación. Seguidamente, en software, se realizaron iteraciones del espesor del blindaje con la finalidad de determinar su vida útil y mediante la distribución de Weibull se estimó la función de confiabilidad y la función de probabilidad de falla, considerando una zafra de duración 240 días.

Palabras clave— *Blindaje, preparación superficial, proyección térmica, material abrasivo, vida útil, confiabilidad, probabilidad de falla.*

Abstract— In the present investigation the shielding was performed, on the flanks of the teeth of a cane mill by means of the flame thermal projection technique using the Eutalloy 11496 micropulverized alloy. Toner is AISI 1045 steel and the shielding surface was prepared by the sandblasting process, using abrasive material of volcanic nature, in order to obtain an optical surface for anchoring the alloy. Next, in software, iterations of the thickness of the shield were realized with the purpose of determining its useful life and through the distribution of Weibull we estimated the function of reliability and the probability function considering a harvest of duration 240 days.

Keywords— *Shielding, surface preparation, thermal projection, abrasive material, life, reliability, probability of failure.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se han registrado investigaciones relacionadas a la ingeniería de

superficies con el objetivo de extender la vida útil de los elementos y las piezas mecánicas, que se encuentran expuestas a medios de desgaste abrasivo y corrosivo; especialmente en la industria azucarera, y en el área de molinos, se ha visto la necesidad de experimentar técnicas de blindaje similares en lo que a recubrimientos duros en cuchillas centrales de molinos se refiere, pero mediante la protección por arco eléctrico y electrodo revestido, es así que, en el año 2002 Adolfo Falcón ^[1] egresado de la ESPOL, realizó estudios de adherencia de metal de aporte sobre las cuchillas centrales, variando los parámetros de soldadura y el tipo de electrodo.

Así mismo, Ronny Aroca ^[2], egresado de la ESPOL, en el 2010 realizó un análisis de recubrimientos duros pero en este caso como elemento de protección contra el desgaste de masas de los molinos de caña, mediante el uso de soldadura por arco; evidenciando mejora en las propiedades de la superficie de las masas.

En lo que respecta a esta investigación, previamente, se ha caracterizado el blindaje por proyección térmica de aleación micropulverizada Eutalloy 11496 en muestras de acero AISI 1045 pertenecientes al virador (cuchilla central) del molino de caña 1 del Ingenio Azucarero San Juan; encontrando los mejores resultados de resistencia al desgaste abrasivo y a la corrosión, en las probetas que llevan blindaje sin la presencia de defectos y que tuvieron una preparación superficial por sandblasting con el uso de material abrasivo mineral de naturaleza volcánica. Los ensayos de desgaste abrasivo ^[3] y el de corrosión acelerada en cámara de niebla salina ^[4], estuvieron basados en las normas ASTM G-65 y ASTM B-117, respectivamente, y de

acuerdo a estos indicadores se procede a realizar el blindaje de los flancos de los dientes del virador de un molino de caña con la finalidad de que la vida útil del blindaje sea favorable a una zafra de duración 240 días.

II. PARTE EXPERIMENTAL

A. Materiales

- El material del virador es de acero AISI 1045
- El material de aporte para el blindaje es la aleación micropulverizada Eutalloy 11496, misma que está compuesta por 15.5% de níquel y cromo, 3.2% de boro, 3.8% de hierro y 0.7% de carbono.
- El material abrasivo para el proceso de sandblasting es de naturaleza volcánica, con tamaño de partículas en el orden de 1.5mm
- Los gases necesarios para el proceso de proyección térmica son oxígeno y acetileno.

B. Equipos

- Equipo de proyección térmica SUPERJET-S
- Reguladores de presión para oxígeno y acetileno
- Pistola de temperatura FLUKE
- Medidor de rugosidad ELCOMETER 123
- Medidor de espesores DEMAQ QS5
- Medidor de dureza brinell DIGIMESS DP 300.

C. Metodología

Preparación superficial y rugosidad

Para la preparación superficial del virador por sandblasting se utiliza como material abrasivo, un granulo basáltico de origen volcánico; este material abrasivo de lo adquirió en VITECAL y tiene como característica que sus partículas son extraídas al 100% de roca volcánica, tienen una alta pureza en sílice y el tamaño de sus partículas esta en el orden de 1.5mm. La Figura 1, muestra el material abrasivo de origen volcánico.



Figura 1. Material abrasivo mineral para sandblasting
Fuente: Autor

El material abrasivo se carga en la tolva de alimentación y seguidamente se procede a realizar el sandblasting de la superficie del virador (Figura 2).



Figura 2. Sandblasting del virador
Fuente: Autor

Una vez realizado el sandblasting, el aspecto de los flancos del virador queda como se muestra en la Figura 3, con una superficie libre de suciedad, incrustaciones, grasas y lubricantes, que puedan interferir con el anclaje de la aleación metálica.



Figura 3. Virador después del proceso de sandblasting
Fuente: Autor

De acuerdo a experimentaciones de preparación de superficies por medio de sandblasting, se tiene que la rugosidad promedio para conseguir un adecuado anclaje de la aleación metálica micropulverizada Eutalloy 11496 sobre la superficie del acero AISI 1045, es de 4.7 mils o equivalente a 121.2 μm ; este valor será un parámetro guía para conseguir la rugosidad deseada en los flancos de los dientes.

La Figura 4, muestra la medición de la rugosidad en los flancos de los dientes del virador que se encontró en el orden de 4.5 mils (114.3 μm), de acuerdo a la Tabla 1.



Figura 4. Medición de la rugosidad en los flancos de los dientes del virador
Fuente: Autor

Adicionalmente, si se desea relacionar este valor de rugosidad de 4.7 mils, con una norma que regule la medición del perfil de la superficie después de prepararse o limpiarse con un material abrasivo, se tiene que, la NACE (National Association of Corrosion Engineers) [5], especifica unos valores referenciales de perfil de superficie según la NACE Standard RP0287-2002; estos valores se presentan en la Tabla 2, y de acuerdo a esto, el valor de 4.7 mils de rugosidad se podría interpretar que es una preparación de superficie tipo NACE No. 1/SSPC-SP 5, ya que sus límites de perfil de superficie están en el rango de 3.47 – 4.63 mils.

Tabla 1. Valores de rugosidad en los flancos de los dientes del virador
Fuente: Autor

Diente	Rugosidad (mils)		
	Flanco		x
	1	2	
1	4,60	4,30	4,45
2	4,70	4,60	4,65
3	4,30	4,90	4,60
4	4,30	4,20	4,25
5	4,60	4,50	4,55
6	4,70	4,20	4,45
7	4,30	3,80	4,05
8	4,60	4,70	4,65
9	4,90	4,50	4,70
10	4,70	4,60	4,65
11	4,10	4,50	4,30
12	4,50	4,70	4,60
13	4,90	5,00	4,95
14	4,20	4,50	4,35
15	4,50	4,30	4,40
16	4,60	4,40	4,50
17	4,70	4,40	4,55
18	4,30	4,50	4,40
19	4,60	4,20	4,40
20	4,10	4,20	4,15
21	4,40	4,20	4,30
22	4,70	4,60	4,65
23	4,30	4,50	4,40
24	4,50	4,50	4,50
25	4,70	4,10	4,40
26	4,10	4,50	4,30
27	4,80	4,70	4,75
28	4,50	4,30	4,40
29	4,70	4,70	4,70
30	4,70	4,50	4,60
31	4,50	4,80	4,65
32	4,70	4,20	4,45
33	4,20	4,00	4,10
34	4,80	5,20	5,00
35	4,50	4,60	4,55
36	4,60	4,90	4,75
37	4,50	4,20	4,35
38	4,70	4,40	4,55
39	4,60	4,70	4,65
40	4,30	4,50	4,40
41	4,20	4,50	4,35
42	4,90	4,70	4,80
43	4,70	4,50	4,60

4,51

Tabla 2. Valores de perfil de superficie según la norma NACE RP0287-2002

Fuente: Autor

Number	Avg.	95% Confidence Limits ^(B)		
		Low	High	
1. S230	NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.72	2.41	3.03
2. S230	NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.02	1.54	2.49
3. S390	NACE No. 1/SSPC-SP 5	4.05	3.47	4.63
4. S390	NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.38	3.33
5. GL-50	NACE No. 1/SSPC-SP 5	2.31	2.15	2.48
6. GL-50	NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.00	1.81	2.19
7. GL-25	NACE No. 1/SSPC-SP 5	3.94	3.41	4.47
8. GL-25	NACE No. 3/SSPC-SP 6	3.46	2.88	4.04
9. BB4016	NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.14	1.93	2.35
10. BB4016	NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.87	1.74	1.99
11. 16/40 Sand	NACE No. 2/SSPC-SP 10	2.22	2.04	2.41
12. 16/40 Sand	NACE No. 3/SSPC-SP 6	1.89	1.72	2.05
13. 12/20 Al ₂ O ₃	NACE No. 2/SSPC-SP 10	3.18	2.93	3.44
14. 12/30 Al ₂ O ₃	NACE No. 3/SSPC-SP 6	2.85	2.59	3.11

Calibración de los parámetros de proyección térmica

Los parámetros a controlar previo al proceso de proyección térmica, son las presiones de los gases que hacen posible la combustión de la aleación metálica micropulverizada; estos gases son el oxígeno y el acetileno; estas presiones se calibran de acuerdo a la boquilla que se utilice. Los tipos de boquillas y las presiones de trabajo que recomienda el equipo SUPERJET-S se muestran en la Figura 5, y su uso se detalla a continuación:

Tip assembly	Oxygen		Acetylene	
	bar	psi	bar	psi
A0 S	1,5	22	0,5	7,5
A1 S	2,0	30	0,5	7,5
A2 S	2,5	37	0,5	7,5
B3 S	2,5	37	0,6	9,0
B4 S	2,5	37	0,6	9,0
C5 S	4,0	60	1,0	15,0

Figura 5. Tipos de boquillas y presiones de trabajo establecidas para los gases, oxígeno y acetileno

Fuente: Autor

- Boquilla A0 S: útil para recargues puntuales de precisión
- Boquillas A1 S y A2 S: útil para precisión lineal
- Boquillas B3 S y B4 S: son boquillas intermedias estándar
- Boquilla C5 S: es la boquilla de mayor potencia

Para el caso del blindaje de los flancos de los dientes del virador se utilizará una de las boquillas intermedias estándar, B3 S, y de acuerdo a eso las presiones para el oxígeno y acetileno son 37 y 9.0 psi, respectivamente. (Figura 6).



Figura 6. Presiones configuradas para los gases, oxígeno y acetileno

Fuente: Autor

Pre calentamiento superficial

La temperatura de pre calentamiento de la superficie, es un aspecto muy importante a controlar, debido a que, experimental se ha evidenciado que si la temperatura de pre calentamiento de la superficie se encuentra por debajo de 200°C, existe desprendimiento del material de aporte, debido a una mala fundición del polvo metálico sobre la superficie del acero. Los mejores resultados se obtienen, cuando la temperatura de pre calentamiento de la superficie, se encuentra en el rango de 320 y 420°C; de acuerdo a esto se controló que la temperatura de pre calentamiento de los flancos de los dientes del virador se encuentren dentro de lo estimado. (Figura 7).



Figura 7. Pre calentamiento de los flancos de los dientes del virador, con un control de temperatura entre 320 y 420°C

Fuente: Autor

Proceso de blindaje por proyección térmica

Inmediato al precalentamiento de la superficie, se procede a depositar el polvo metálico sobre la superficie de los flancos de los dientes; esto se hace presionando el gatillo de la antorcha y debe realizarse depositando de manera uniforme sobre la superficie, evitando formar aglomeraciones de polvo metálico y evitando también dejar zonas vacías sin metal de aporte.

Una vez distribuido uniformemente el polvo metálico sobre la superficie de los flancos de los dientes, se procede a fundirlo, visualizando que fluya y que se distribuya en toda la superficie. La técnica que se adquiera en este proceso, garantizará la calidad del blindaje, en términos de evitar la presencia de defectos superficiales como son grietas y poros. Del espesor que se necesite conseguir, dependerá la cantidad de pases a realizar; en este caso y de acuerdo a los resultados obtenidos en las experimentaciones anteriores, se desea conseguir un espesor que se aproxime a 1mm, de tal manera que únicamente se realizó un pase de polvo metálico. La Figura 8, muestra la aplicación del blindaje en un sector de los flancos de los dientes del virador.



Figura 8. Aplicación del blindaje en los flancos de los dientes del virador
Fuente: Autor

Medición del espesor de blindaje

La Figura 9, muestra la comparación de espesores antes y después del blindaje, tomado en uno de los flancos de los dientes del virador. Los demás valores de espesor se muestran en la Tabla 3. Es preciso previo a la medición que se calibre en cero el equipo.

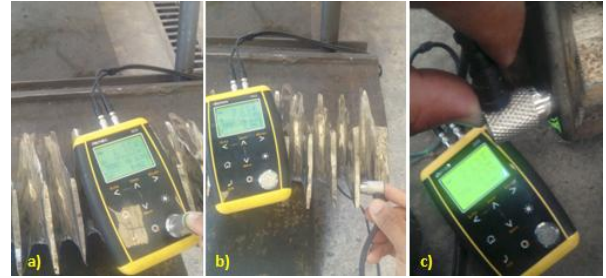


Figura 9. Medición de espesor en los flancos de los dientes del virador, a) calibración en cero del equipo, b) medición antes del blindaje, c) medición después del blindaje
Fuente: Autor

Tabla 3. Valores de espesor en los flancos de los dientes del virador
Fuente: Autor

Espesor (mm)		
Flanco 1		x
Inicial	Final	
7,77	8,77	1,00
7,69	8,70	1,01
7,75	8,76	1,01
7,70	8,73	1,03
7,68	8,72	1,04
7,65	8,65	1,00
7,71	8,75	1,04
7,70	8,70	1,00
7,72	8,73	1,01
7,70	8,73	1,03
7,67	8,68	1,01
7,80	8,76	0,96
7,62	8,67	1,05
7,88	8,85	0,97
7,50	8,50	1,00
7,64	8,65	1,01
7,58	8,59	1,01
7,67	8,72	1,05
7,77	8,79	1,02
7,58	8,64	1,06
7,62	8,62	1,00
7,74	8,77	1,03

Tabla 3. Continuación
Fuente: Autor

7,69	8,71	1,02
7,67	8,67	1,00
7,63	8,65	1,02
7,68	8,68	1,00
7,60	8,64	1,04
7,65	8,67	1,02
7,59	8,62	1,03
7,58	8,63	1,05
7,63	8,67	1,04
7,63	8,63	1,00
7,68	8,68	1,00
7,54	8,60	1,06
7,65	8,67	1,02
7,68	8,68	1,00
7,59	8,64	1,05
7,58	8,57	0,99
7,61	8,62	1,01
7,70	8,70	1,00
7,68	8,67	0,99
7,56	8,57	1,01
7,57	8,57	1,00

1,02

Medición de dureza del blindaje

Para verificar la dureza del blindaje, primero es necesaria la calibración del equipo (Figura 10), esto se lo realiza con el patrón que viene incorporado; después de esto se procede a medir la dureza de los flancos de los dientes, para después relacionar este valor con la dureza inicial. Se han obtenido en promedio un incremento de la dureza brinell del blindaje hasta el 59% con respecto a la dureza del material. (Tabla 4)



Figura 10. Medición de dureza brinell en blindaje, a) Calibración del equipo, b) Registro de dureza brinell

Fuente: Autor

Tabla 4. Valores de dureza Brinell en los flancos de los dientes del virador

Fuente: Autor

Dureza Brinell (HB)		
Flanco 1		%
Inicial	Final	
152,10	243,20	62,54
145,1	254,5	57,01
147,3	247,8	59,44
145,5	251,9	57,76
142,7	242,3	58,89
149,5	248,7	60,11
148,4	253,4	58,56
146,2	250,4	58,39
147,2	254,6	57,82
149,1	245,4	60,76
147,4	248,1	59,41
145,2	243,8	59,56
148,6	246,7	60,24
148,3	253,3	58,55
147,0	250,7	58,64
145,6	249,8	58,29
142,7	246,6	57,87
148,4	252,1	58,87
146,7	247,5	59,27
146,2	250,2	58,43
142,7	248,5	57,42
147,1	245,5	59,92
145,2	247,9	58,57
149,3	247,3	60,37
150,1	248,4	60,43
147,8	246,8	59,89
152,6	249,1	61,26
147,2	254,1	57,93
151,1	248,0	60,93
152,6	245,5	62,16
149,5	247,3	60,45
146,7	243,6	60,22
152,7	247,8	61,62
154,1	246,4	62,54
145,5	251,4	57,88
146,3	254,6	57,46
149,4	251,2	59,47
147,5	247,6	59,57
148,5	245,5	60,49
146,7	247,1	59,37
146,7	252,4	58,12
143,8	253,1	56,82
149,7	245,4	61,00

59,4

Caracterización del blindaje

El blindaje ó recubrimiento de aleación micropulverizada Eutalloy 11496, si lo analizamos con técnicas microscópicas, debe caracterizarse por los siguientes aspectos:

- Debe presentar una distribución uniforme sobre la superficie del sustrato, en este caso sobre la superficie de los flancos de los dientes del virador, en la Figura 11, se pueden observar los depósitos de aleación metálica aplicados a un pase sobre la superficie y distribuidos uniformemente sin dejar vacíos o aglomeraciones de polvo sin fundir. Uno de los aleantes del polvo metálico que se encarga de generar fluidez en la deposición es el boro, ya que actúa como agente fundente.

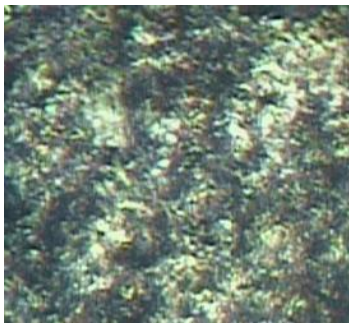


Figura 11. Material de blindaje distribuido de manera uniforme en la superficie, imagen microscópica a 200X
Fuente: Autor

- Otro de los aspectos es verificar microscópicamente que no existan defectos superficiales en el blindaje, ya que experimentalmente, se pudo determinar que un simple poro o grieta, se convierte en el “foco” de inicio de la degradación del material por efecto de la acumulación de sustancias corrosivas; esto se pudo constatar en el ensayo de corrosión acelerada en la cámara de niebla salina, con tiempos de exposición 100 y 200 horas. La Figura 12, muestra un ejemplo de porosidad que se presenta en el blindaje y como incide esta ante un entorno corrosivo.

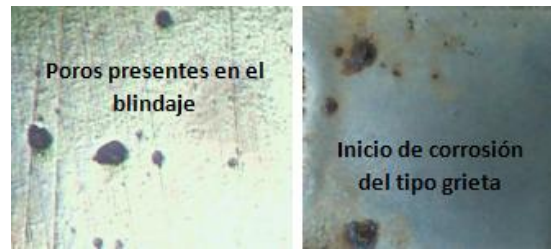


Figura 12. Corrosión por grietas debido a la acumulación de sustancias salinas en el blindaje
Fuente: Autor

En este aspecto, aunque el cromo y el níquel presentes en la aleación metálica, trabajan en pro de la resistencia a la corrosión del material, bastará con un defecto superficial para que inicie el proceso de degradación puntual, hasta que se contamine toda la superficie.

- Finalmente se tiene que, la dureza del blindaje debe reflejar un incremento con respecto al sustrato, de aproximadamente el 50%. Los elementos aleantes del polvo metálico destinado al blindaje y que aportan a la dureza superficial, son el silicio y el boro, ya que al combinarse con el carbono, permitirá la formación de carburos de silicio y carburos de boro, favoreciendo con ellos a la resistencia al desgaste por abrasión.

Análisis de la vida útil del blindaje

Las consideraciones que se tomaron en cuenta para desarrollar el criterio de vida útil del blindaje se basaron en el Tribology Handbook “Friction Wear Lubrication” [6], en donde se estudia el fenómeno del desgaste de acuerdo al contacto entre superficies, demostrando que hay influencia de la presión de contacto sobre la intensidad del desgaste de las superficies asentadas; de acuerdo a aquello, el autor Kragelsky presenta la siguiente ecuación de vida útil:

$$V_u = \frac{\text{Masa del perfil de ataque} \cdot \text{tiempo ensayo al desgaste de las probetas}}{\text{peso perdido de las probetas ensayadas}} \text{Ec. 1}$$

Para la ecuación anterior, el dato que no se conoce es la masa del perfil de ataque, que en este caso es, la masa del espesor de blindaje de todos los flancos de los dientes del virador; es por eso, que con la ayuda de un software, se procede a modelar el virador de caña del molino (Figura 13), para determinar la masa del perfil de ataque de todos los flancos de los dientes. Los demás factores de la ecuación 1, son conocidos de acuerdo a experimentaciones, sean estos, el tiempo de duración del ensayo de desgaste por abrasión que es de 11 minutos, el peso perdido de las probetas ensayadas, será, el peso perdido de las probetas que presentaron mejor comportamiento al desgaste abrasivo, siendo estas, las de blindaje con preparación superficial por sandblasting y cuyo valor promedio de pérdida de peso es 0.0928 gramos.

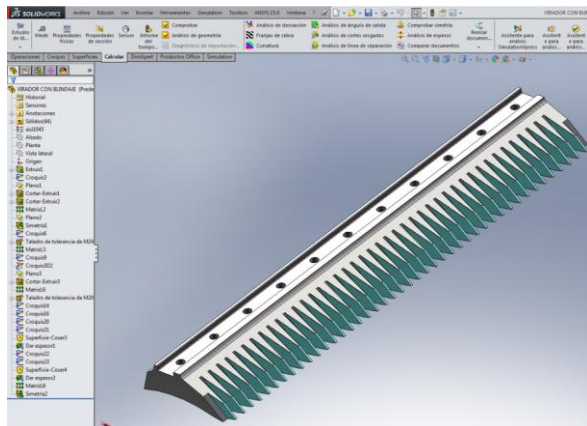


Figura 13. Modelado en software de los flancos de los dientes del virador del molino de caña
Fuente: Autor

En el software se modelaron los flancos de los dientes como un elemento independiente del virador, con la finalidad de poder seleccionarlos y calcular su masa; de acuerdo a esto, se tomó el criterio de iterar el espesor de blindaje entre 0.5 a 1.3 mm para obtener la masa de los flancos de los dientes según el espesor de blindaje.

La Figura 14, muestra el gestor de propiedades mecánicas del software, en donde se puede visualizar el valor de la masa de los flancos de los dientes del virador, que será también el valor de la masa del perfil de ataque que solicita la ecuación 1; de acuerdo a esto se

presenta también la Tabla 5, misma que indica la masa de los flancos de los dientes, según determinado espesor.

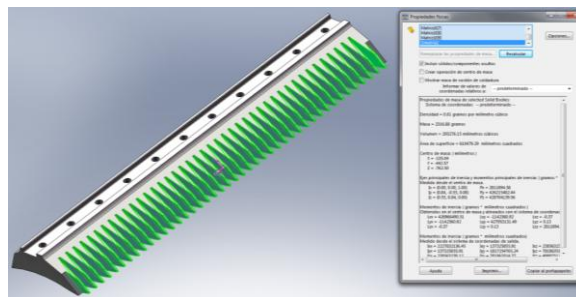


Figura 14. Gestor de propiedades mecánicas del software que indica la masa de los flancos de los dientes del virador
Fuente: Autor

Tabla 5. Valores de la masa de los flancos de los dientes según el espesor modelado
Fuente: Autor

Espesor (mm)	Masa (g)
0,50	1191,19
0,60	1415,27
0,70	1639,89
0,80	1865,03
0,90	2090,69
1,00	2316,88
1,10	2543,60
1,20	2770,84
1,30	2998,60

Con los valores de la masa de los flancos de los dientes del virador, el tiempo de duración del ensayo de desgaste abrasivo de las probetas, el peso perdido de las probetas ensayadas y con la ecuación 1, se calcula la vida útil del blindaje según el espesor aplicado; los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de vida útil del blindaje según el espesor
Fuente: Autor

Espesor de blindaje (mm)	Tiempo ensayo (min)	Masa ataque (g)	Peso perdido (g)	Vida útil blindaje (días)
0,50	11,0	1191,19	0,0928	98,05
0,60	11,0	1415,27	0,0928	116,50
0,70	11,0	1639,89	0,0928	134,99
0,80	11,0	1865,03	0,0928	153,52
0,90	11,0	2090,69	0,0928	172,10
1,00	11,0	2316,88	0,0928	190,72
1,10	11,0	2543,60	0,0928	209,38
1,20	11,0	2770,84	0,0928	228,08
1,30	11,0	2998,60	0,0928	246,83

De acuerdo a este criterio de cálculo y según la Tabla 6, se puede decir que para que el blindaje de los flancos de los dientes del virador de molino de caña resista los 8 meses de duración de la zafra (240 días) ante un medio de desgaste abrasivo y corrosivo, éste deberá tener un espesor de 1.3mm.

Análisis de la confiabilidad del blindaje por la distribución de Weibull

Para el análisis de Weibull, es necesario conocer el significado del término “falla”, y de acuerdo al Weibull Handbook [7], la falla se refiere a cualquier incidente o condición que cause la degradación de un producto, proceso o material de tal forma que ya no pueda realizar las funciones de una manera segura, confiable y a un costo razonable para el que fue concebido; estas fallas ocurren de manera incierta y son influenciadas por el diseño, manufactura o construcción, mantenimiento y operación, así como también factores humanos.

Existe una curva típica de fallos (curva de la bañera) que representa los diferentes tipos de falla que un equipo o componente del mismo sufre durante el periodo de tiempo desde su puesta en operación hasta que termina su ciclo de vida útil. La Figura 15, muestra la curva representativa de los tres componentes que forman la curva típica de flujo de fallas o también conocida como la curva de la bañera.

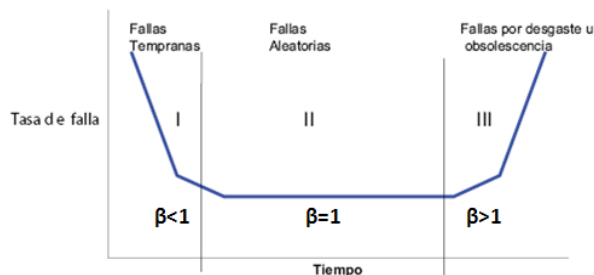


Figura 15. Curva de flujo de fallas o curva de la bañera
Fuente: Autor

En la Figura 15, las fallas tempranas, están asociadas con equipos nuevos y pueden ser causadas por partes faltantes, falta de capacitación de las personas que instalan el equipo, daño causado a los aparatos o dispositivos, o fallas por defectos de fabricación de las máquinas. La zona II de fallas aleatorias, son inesperadas y pueden surgir por sobrecargas y averías, causadas por factores externos que generan las fallas aún de las piezas mejor construidas; en la curva está representada por una línea horizontal. La zona III, de fallas por desgaste u obsolescencia, son fallas debido a edad, fatiga, corrosión, deterioro mecánico, eléctrico, hidráulico, o por el bajo nivel de mantenimiento y reparación.

Las funciones Weibull de confiabilidad y de tasa de falla propuestas por Waloddi Weibull, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad \text{Ec 2}$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad \text{Ec 3}$$

Donde:

$R(t)$ – Función de confiabilidad de probabilidad
 β – es el parámetro de forma y es el indicador del mecanismo de falla

α – es el parámetro de escala – vida característica

γ – es el parámetro de localización- la vida mínima. Cuando $\gamma = 0$ la ecuación 2 queda en función de 2 parámetros.

$F(t)$ – Función de densidad de probabilidad de tasa de falla

Según Shigley [8], de diseño en ingeniería mecánica, menciona que el parámetro β (b) controla el sesgo de la distribución, entonces de acuerdo a la Figura 16, para β grandes la distribución tiene un sesgo hacia la derecha, mientras que para β pequeñas, se aprecia un

sesgo hacia la izquierda. Cuando $\beta = 1$, la distribución es exponencial.

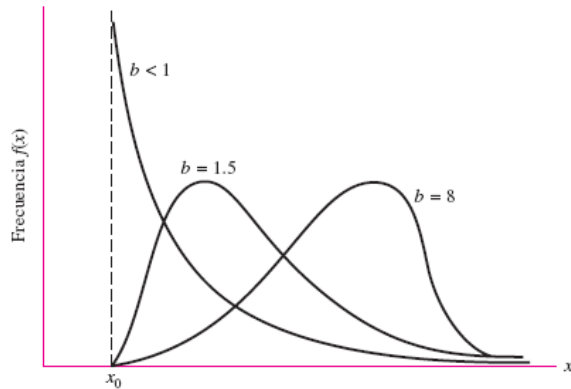


Figura 16. Función de densidad de la distribución de Weibull mostrando el efecto del sesgo del parámetro de forma β
Fuente: Autor

La distribución de Weibull no sirve cuando no han ocurrido fallas, es decir, sirve para caracterizar el histórico de averías o fallas en componentes, permitiendo la determinación de las probabilidades de fallo y duración media de cada componente.

Para poder graficar la relación confiabilidad – edad, sólo se necesita determinar (cálculo a partir de datos históricos) los valores de los parámetros β y (α). Estos gráficos ayudan a comprender el comportamiento histórico de falla de los componentes y de los modos de falla de interés.

Conociendo los valores de la media aritmética (\bar{x}), la varianza (S^2), la desviación estándar (S), el tiempo de falla de cada evento (t_i) y el número de datos o eventos (n), se pueden determinar los parámetros β y α ; las ecuaciones siguen a continuación:

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Ln}(t_i)}{n} \quad \text{Ec 4}$$

- Varianza

$$S^2 = \frac{(\sum \text{Ln}(t_i) - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad \text{Ec 5}$$

- Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec 6}$$

- Parámetro β

$$\beta = \frac{\pi}{S \sqrt{6}} \quad \text{Ec 7}$$

- Parámetro α

$$\alpha = \exp\left(x + \left(\frac{0.5772}{\beta}\right)\right) \quad \text{Ec 8}$$

- $\gamma = 0$ cuando no existen datos de falla anterior del elemento

Representación gráfica de Weibull para el blindaje

Es preciso mencionar que en los registros del Ingenio Azucarero San Juan no existen históricos de falla del virador, pero es un elemento que se lo cambia cada año debido a la degradación del material, en especial en la zona de los dientes (Figura 17); debido a esto los tiempos de falla que se utilizaran en el cálculo de la confiabilidad y probabilidad de fallo, serán los que se determinaron de acuerdo a la Tabla 6, que indica la vida útil de los flancos de los dientes del virador según el espesor de blindaje que se aplique.

Con la aclaración anterior, se procede al cálculo de la media aritmética (\bar{x}), la varianza (S^2), la desviación estándar (S), el parámetro de forma β y el parámetro de escala (α); según las respectivas ecuaciones se obtiene los resultados de la Tabla 7.

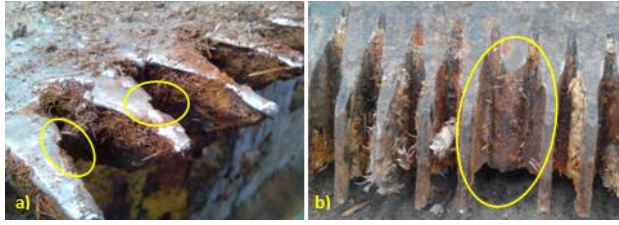


Figura 17. Degradación del material de los dientes del virador después de 120 días de zafra, a) flanco de diente despillado, b) desprendimiento total del diente

Fuente: Autor

Tabla 7. Cálculo de variables para determinar la confiabilidad del blindaje

Fuente: Autor

Media aritmética \bar{x} =	5,107090963
Varianza S^2 =	0,098002163
Desviación estándar S =	0,313052971
Parámetro de forma β =	4,09690994
Parámetro de escala α =	190,1812631
Parámetro de localización γ =	0

Con los datos obtenidos de las Tablas 6 y 7, y en el software se procede a calcular la confiabilidad y probabilidad de falla de los flancos de los dientes del virador, mediante el uso de las Ecuaciones 2 y 3; obteniendo los resultados de la Tabla 8.

Tabla 8. Valores calculados de la confiabilidad y probabilidad del fallo del blindaje

Fuente: Autor

Espesor (mm)	Tiempo (días)	$\ln(t_i)$	$(\ln(t_i) - \bar{x})^2$	$R(t)$	$F(t)$
0,50	98,05	4,58551361	0,27204294	0,42711683	0,57288317
0,60	116,50	4,75788112	0,121947512	0,41178566	0,58821434
0,70	134,99	4,90518996	0,040764013	0,39862470	0,60137530
0,80	153,52	5,03383794	0,005366006	0,38709934	0,61290066
0,90	172,10	5,14805495	0,001678048	0,37685105	0,62314895
1,00	190,72	5,25078225	0,020647186	0,36762760	0,63237240
1,10	209,38	5,34414120	0,056192814	0,35924529	0,64075471
1,20	228,08	5,42971132	0,104083896	0,35156619	0,64843381
1,30	246,83	5,50870631	0,161294888	0,34448352	0,65551648

$\Sigma =$ 45,96381867 0,78401730

Los resultados de la Tabla 8, han permitido generar las gráficas de distribución de Weibull, para la confiabilidad y probabilidad de falla de los flancos de los dientes del virador de caña.

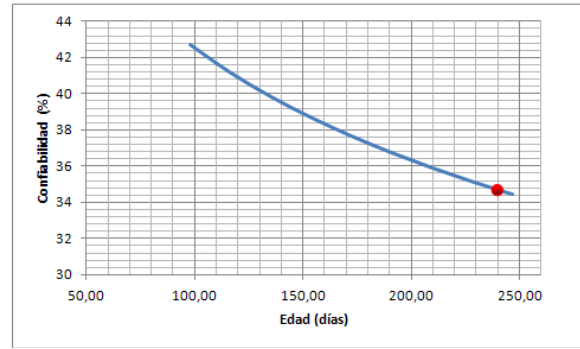


Figura 18. Función de confiabilidad de Weibull para el blindaje

Fuente: Autor

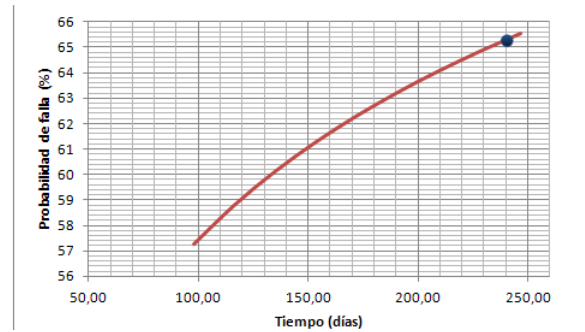


Figura 19. Función de densidad de probabilidad de tasa de falla para el blindaje

Fuente: Autor

En la Figura 18, se puede establecer que para una zafra completa de duración 8 meses (240 días), la confiabilidad del blindaje en los flancos de los dientes del virador, estará en aproximadamente 35%.

En la Figura 19, se puede revisar que la probabilidad de falla del blindaje en los flancos de los dientes del virador de caña al cumplirse los 8 meses de zafra (240 días) será aproximadamente del 65%.

III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Con el criterio de vida útil relacionado al ensayo de desgaste por abrasión desarrollado experimentalmente, y seleccionando el mejor comportamiento que obtuvo el blindaje en cuanto a la menor pérdida de masa y mejor resistencia al

desgaste, se ha podido determinar que, con la aplicación de un espesor de blindaje de 1.3mm en los flancos de los dientes del virador, se puede llegar a garantizar que este recubrimiento cumpla el tiempo de zafra completo que es de 8 meses (240 días), tomando en cuenta también que el virador se ubica físicamente dentro del molino, en un lugar inaccesible a cualquier tipo de mantenimiento que se lo desea realizar, en los paros por mantenimiento programados cada 15 a 18 días.

- En el análisis de confiabilidad del blindaje de los flancos de los dientes del virador mediante el uso de la distribución de Weibull, se ha podido determinar que el blindaje puede finalizar el tiempo de zafra de 8 meses (240 días), pero estaría con una confiabilidad de operación del 35%. Y quizá es precisamente lo que se desea conseguir, que el blindaje haga el papel de esclavo de sacrificio, y que se desgaste al máximo, con la finalidad de que al terminar la zafra, se vuelvan a blindar los flancos de los dientes para la siguiente temporada de operaciones y así evitar el desgaste del material “madre” ó la adquisición de nuevos viradores.
- En términos de la probabilidad de falla del blindaje, es complementario a lo antes descrito, ya que el blindaje de los flancos de los dientes del virador al llegar a los 240 días de trabajo (8 meses), su probabilidad de falla estará en aproximadamente el 65%. Ubicándonos en la curva de la bañera de la Figura 15, estamos dentro de la zona III de fallas por desgaste u obsolescencia, debido también a que el valor calculado del parámetro de forma resulta ser $\beta > 1$; pero se debe aclarar que en esta zona III, se habla del blindaje o recubrimiento que se realizó a los flancos de los dientes, más no al virador, ya que éste debería estar protegido con el esclavo de sacrificio al desgaste que es la aleación micropulverizada Eutalloy 11496.

IV. CONCLUSIONES

- El estudio realizado es un complemento a los ensayos de desgaste por abrasión y corrosión acelerada en cámara de niebla salina, desarrollados previamente; y de acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo de desgaste por abrasión bajo la norma ASTM G-65, se ha podido determinar la duración del ensayo (11 minutos) y la pérdida de masa de las probetas (0.0928 gramos) que muestran mejor comportamiento al desgaste, sean estas las de acero AISI 1045 que llevan blindaje de espesor 1.3mm y cuya superficie ha sido preparada mediante el proceso de sandblasting con el uso de material abrasivo de naturaleza volcánica.
- El objetivo de verificar la vida útil de los flancos de los dientes del virador, para un tiempo de 240 días, es tomando en cuenta el espacio inaccesible que se tiene en la zona de molinos, para realizar un mantenimiento rutinario al virador; debido a esto, se proyecta un blindaje en los flancos de los dientes, que resista al desgaste abrasivo y corrosivo en toda la zafra.
- La confiabilidad del blindaje de los flancos de dientes del virador para un tiempo de 240 días, ha resultado ser del 35%; esto le corresponde a que estará expuesto ante un medio agresivo por desgaste por abrasión, como es, la materia extraña que trae la caña desde los cañaverales hacia la zona de molienda; sean estas materias extrañas: hojas, raíces, cogollos, piezas de metal que pudieron desprenderse de las herramientas de corte de caña, piedras, arena, etc. Las hojas de la caña tienen gran contenido de sílice y estas a su vez traen al molino gran cantidad de arena, factores que aumentan el desgaste por abrasión de las piezas.
- Así mismo, con el blindaje se desea incrementar la resistencia a la corrosión, ya que la acidez del jugo de caña (5.1 – 6.3 pH) es otra de las principales causas del deterioro de las piezas del molino; incluyendo también el ambiente marítimo salino debido a las cercanías del ingenio a las costas del mar.

V. REFERENCIAS

- [1] FALCÓN A., Aplicación de recubrimientos duros – protectores por arco eléctrico – electrodo revestido en las cuchillas centrales de molinos de caña, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2002.
- [2] AROCA R., Análisis de recubrimientos duros para molinos de caña de azúcar, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2010.
- [3] ASTM G-65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus
- [4] ASTM B-117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- [5] NACE INTERNATIONAL: Standard RP0287-2002. Field Measurement of Surface Profile of Abrasive Blast-Cleaned Steel Surfaces Using a Replica Tape.
- [6] KRAGELSKY V. Friction Wear Lubrication, Moscow, Mir Publishers.
- [7] ABERNETHY R., Weibull Analysis Handbook. Florida. U.S.A, 1933.
- [8] BUDYNAS R., Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, México, 8va edición. McGraw-Hill, 2008.