



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis del mecanismo de desgaste de tres materiales de Recubrimiento en cámara de molienda de un molino vertical para cemento

Juan Diego Hende Ortiz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2017

Análisis del mecanismo de desgaste de tres materiales de Recubrimiento en cámara de molienda de un molino vertical para cemento

Juan Diego Hende Ortiz

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Materiales y Procesos

Director (a):

Msc. Edgar Espejo Mora

Línea de Investigación:

Análisis de Falla

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2017

Dedico este trabajo a mi familia por su apoyo incondicional en cada instante de mi vida.

“Porque de tal manera amó Dios al mundo que ha dado a su hijo unigénito para que todo aquel que en Él cree no se pierda más tenga vida eterna.”

San Juan 3:16

Agradecimientos

Primero a Dios porque: “De El mana la vida”, a mi amada esposa, Tatiana Guasgüita, a mis hijos, Manuela y David Hende, porque son el motor de mi vida.

A la universidad Nacional de Colombia, por permitirme realizar mis estudios, al ingeniero Edgar Espejo Mora, Director de tesis, por guiarme y ayudarme a adquirir el conocimiento necesario para el desarrollo de esta investigación, a John Castañeda, Felipe Giraldo, Mario Remolina, Karla Guerrero, Eduardo González, Hugo Vargas y todos mis amigos, profesores y compañeros que de una u otra manera siempre me apoyaron y respaldaron en este propósito.

A los ingenieros de Holcim Colombia, Javier Victoria, Daniel Montañez, Nadia Pérez, Mario Díaz y Manolo González, por facilitar y apoyar el desarrollo de los análisis experimentales.

Resumen

A lo largo de este trabajo de investigación se pudo evidenciar el comportamiento de dos materiales comúnmente utilizados a nivel industrial como recubrimientos antidesgaste, lámina recubierta con soldadura, lámina termotratada y uno que no es utilizado para este tipo de aplicaciones como lo es la silicona RTV (seleccionada por su comportamiento a altas temperaturas) y su mecanismo de desgaste predominante. Todos ellos fueron sometidos a un ambiente real y continuo de alta exigencia y bajo condiciones físicas de temperatura (90°C - 220°C), velocidad (desde 4,1m/s hasta 47m/s) y erosión agresivas, siendo la variable de respuesta principal para evaluar el desgaste, la pérdida de peso, cuyos valores fueron utilizados para realizar análisis estadísticos mediante los cuales se pudieron establecer las similitudes y/o diferencias entre la utilización de uno u otro material considerando la ubicación dentro de la cámara del molino. Sumado a ello, mediciones como la dureza permitieron determinar la condición del material posterior al paso de muchos ciclos de trabajo.

Así mismo se utilizaron las técnicas de caracterización SEM y estereoscopía para evidenciar la condición superficial de los materiales y la metalografía para poder visualizar las diferentes fases de las aleaciones y así se pudo interrelacionar su comportamiento con la química y metalurgia de su composición. Todo lo anterior para definir adecuadamente el mecanismo de desgaste predominante.

En términos generales se observó que existen diferencias significativas en cuanto al desempeño de todos los materiales en una posición ó zona determinada dentro del molino, aun cuando entre diferentes posiciones o zonas no hubo mayores diferencias. Sin embargo, fue importante encontrar que para una de las zonas cualquiera de los tres materiales podría utilizarse indistintamente, el cual fue un hallazgo significativo en términos de los objetivos propuestos en principio. Se apreció también que aun cuando la composición química y metalurgia de las láminas recubiertas parece ser igual a simple vista, la microestructura no es uniforme y por tanto pudiera llegar a ser un punto de mejora significativo dentro del proceso de fabricación respectivo.

Los mecanismos de desgaste fueron correspondientes con los descritos en la literatura para cada uno de los materiales presentándose deformación plástica evidenciada con arado superficial, formación de labios alrededor de los surcos y finalmente desprendimiento de material por fatiga.

Se pudo apreciar que para la generalidad del análisis experimental que se realizó, la lámina recubierta tuvo el mejor desempeño, aun cuando en algunos casos se pudo establecer que puede llegar a ser reemplazada por lámina termotratada ó silicona con posibilidad de tener desempeños similares a menores costos y menos dificultades para la instalación.

Palabras clave: Lámina recubierta, lámina termotratada, silicona RTV, erosión, deformación plástica, molino, mecanismos de desgaste.

Abstract

Throughout this research work it was possible to demonstrate the behavior of two materials commonly used at an industrial level such as wear coatings, coated plate with welding, heat-treated plate and one that is not used for this type of applications as is the RTV silicone (selected for its behavior at high temperatures) and its predominant wear mechanism. All of them were subjected to a real and continuous environment of high demand and under physical conditions of temperature (90 ° C - 220 ° C), speed (from 4.1m / s to 47m / s) and aggressive erosion, being the variable of main response to assess the wear, weight loss, whose values were used to perform statistical analyzes by which they could establish the similarities and / or differences between the use of one or another material considering the location within the chamber of the mill. Added to this, measurements such as hardness allowed to determine the condition of the material after the passage of many work cycles

Likewise, SEM and stereoscopy characterization techniques were used to demonstrate the surface condition of the materials and the metallography in order to visualize the different phases of the alloys and thus their behavior could be interrelated with the chemistry and metallurgy of their composition. All of the above to properly define the predominant wear mechanism.

In general terms, it was observed that there are significant differences in the performance of all the materials in a certain position or area within the mill, even though between different positions or zones there were no major differences. However, it was important to find that for one specific zone any of the three materials could be used interchangeably, which was a significant finding in terms of the objectives proposed in principle. It was also appreciated that even though the chemical composition and metallurgy of the coated plates seems to be the same with the naked eye, the microstructure is not uniform and therefore could become a significant improvement point within the respective manufacturing process.

The wear mechanisms were corresponding to those described in the literature for each of the materials, with plastic deformation evidenced by surface plowing, lip formation around the grooves and finally material detachment due to fatigue.

It was possible to appreciate that for the generality of the experimental analysis that was carried out, the coated sheet had the best performance, even though in some cases it could be established

that it could be replaced by heat-treated sheet or silicone with the possibility of having similar performances at lower costs and less difficulties for the installation.

Keywords: Wear, Erosion, Grinding, Coating

Tabla de contenido

Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract	6
Lista de Figuras	12
Lista de Tablas	15
Lista de Anexos	16
Introducción	17
1. Marco Teórico	20
1.1 Proceso de Molienda de Cemento	20
1.2 Molinos Verticales	20
1.3 Materias primas para la fabricación de cemento	24
1.3.1. Clinker	24
1.3.2. Pozulana	25
1.3.3. Cuarzo	26
1.3.4. Yeso	26
1.4 Desgaste de materiales	26
1.5 Erosión por la acción de partículas sólidas	27
1.6 Variables que dominan el efecto erosivo	28
1.6.1. Partículas Erosivas	29
1.6.2. Ángulo de Impacto	30
1.6.3. Velocidad de las partículas de erosivo	33
1.6.4. Flujo de partículas de erosivo	34
1.6.4.1 Número de Reynolds	34
1.6.5. Eficiencia de la erosión	36
1.7 Fenómenos presentes durante la erosión de partícula sólida	37
1.7.1. Impacto elástico normal	37
1.7.2. Impacto plástico normal	37
1.7.3. Impacto elasto/plástico normal	37
1.7.4. Impacto elasto/plástico oblicuo	38
1.8 Tasa de erosión	39

1.9	Materiales antidesgaste	40
1.9.1.	Aceros de Carbono	40
1.9.1.1.	Aceros al carbono	40
1.9.1.2.	Aceros de Alto Carbono.	41
1.9.2.	Materiales para recubrimientos	41
1.9.2.1.	Carburos de Cromo	41
1.9.2.2.	Lámina recubierta por soldadura o proyección térmica	41
1.9.3.	Aceros aleados antiabrasión	42
1.9.3.1.	Cromo	43
1.9.3.2.	Manganeso	43
1.9.3.3.	Silicio	43
1.9.3.4.	Níquel	43
1.9.3.5.	Molibdeno	43
1.9.3.6.	Vanadio	43
1.9.3.7.	Lámina Termotratada	44
1.9.3.8.	Lámina Recubierta con Soldadura	44
1.9.4.	Polímeros	48
1.9.4.1.	Silicona	49
1.10	Mecanismos de falla	50
1.10.1.	Mecanismos de falla durante la erosión de metales	51
1.10.1.1	Mecanismo de desgaste frágil	51
1.10.1.2	Mecanismo de falla Dúctil	57
1.10.2.	Mecanismo de falla durante la erosión en elastómeros	59
1.11	Ensayos de Caracterización Mecánica	62
1.11.1.	Peso	63
1.11.2.	Estereoscopia	63
1.11.3.	Microscopia electrónica de barrido SEM	64
1.11.3.1.	Resolución	65
1.11.3.2.	Profundidad de campo	65
1.11.3.3.	Volumen de emisión y la penetración máxima	65
1.11.4.	Metalografía	66
1.11.5.	Dureza	67
1.11.5.1.	Ensayo Brinell	68

1.11.5.2. Ensayo Rockwell	68
1.11.5.3. Ensayo Vickers.	69
1.12 Caracterización Química	69
1.12.1. Espectroscopia	69
2. Desarrollo experimental	72
2.1 Diseño del experimento	72
2.2 Preparación de las muestras	77
2.2.1. Equipos y materiales	78
2.3 Elaboración de las unidades muestrales	83
2.4 Pesaje de las unidades muestrales	84
2.5 Montaje del experimento	84
2.6 Desmontaje del experimento y pesaje	88
2.7 Estereoscopia	89
2.8 Corte de probetas	90
2.9 Metalografía	91
2.10 Microscopía electrónica de barrido SEM	92
2.11 Dureza	93
2.12 Espectroscopia	93
3.1 Pesaje	94
3.1.1 Peso Inicial	94
3.1.2 Peso Final	96
3.2 Variables que dominan el efecto erosivo	103
3.2.1 Velocidad de las partículas erosivas.	103
3.2.2 Tipo flujo del erosivo	103
3.3 Tasa de erosión	106
3.4 Estereoscopia	107
3.5 Metalografía	115
3.6 Microscopia electrónica de barrido SEM	116
3.7 Mediciones de Dureza y Microdureza	127
3.8 Espectroscopia	130
3.9 Eficiencia de la Erosión	132
3.10 Análisis estadístico	133
3.10.1 Análisis de Varianza para todos los tratamientos.	134

3.10.2 Análisis de Varianza Velocidad Baja (Grupos 3 y 8)	136
3.10.3 Análisis de Varianza Velocidad Media (Grupos 1,2,5 y 7)	139
4.1 Mecanismos de desgaste	148
4.1.1 Materiales metálicos	149
4.1.2 Silicona	162
5. Conclusiones y recomendaciones	164
ANEXO A: Fichas Técnicas de Silicona Utilizadas en Ensayos Preliminares	166
ANEXO B: Resultados pruebas preliminares siliconas y acero Ni-Hard	172
ANEXO C: Distribución Granulométrica Típica en un Molino de Cemento	173
ANEXO D: Tabla de Composición y Durezas de algunos Materiales Recubiertos	174
ANEXO E: Características de los Principales Ensayos de Dureza	175
ANEXO F: Fotografías Generales Finales de las Unidades Experimentales	177
ANEXO G: Fotografías de Análisis Estereoscópicos	210
ANEXO H: Fotografías de Análisis SEM por Grupos Experimentales	246
ANEXO I: Fotografías de Análisis Metalográfico	255
Bibliografía	261

Lista de Figuras

FIGURA 1-1. MOLINO VERTICAL F.L. SMIDTH	21
FIGURA 1-2. DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS INTERNOS	22
FIGURA 1-3. PROCESO GRÁFICO DE MOLTURACIÓN	23
FIGURA 1-4. FLUJO DE GAS AL INTERIOR DEL MOLINO	23
FIGURA 1-5 CURVAS TÍPICAS DE DESGASTE EROSIVO [8]	31
FIGURA 1-6. ACUMULACIÓN DE PESO DEL MATERIAL EROSIVO CONTRA EL TIEMPO [12]	32
FIGURA 1-7. TASA DE EROSIÓN VS VELOCIDAD [12]	33
FIGURA 1-8. MICROESTRUCTURA HIPEREUTÉCTICA DE DEPÓSITO DE SOLDADURA ANTIDESGASTE, MOSRND0 GRANDES CARBUROS PRIMÁRIOS DE CROMO, FECr	45
FIGURA 1-9. DESGASTE EROSIVO PARA LA ALÚMINA EN DIFERENTES ÁNGULOS [29]	47
FIGURA 1-10. DESGASTE EROSIVO PARA LA SÍLICE EN DIFERENTES ÁNGULOS [29]	47
FIGURA 1-11. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA SILICONA	49
FIGURA 1-12. POSIBLES MECANISMOS DE EROSIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS [13]	51
FIGURA 1-13. RECUBRIMIENTO BASE WC MARS6B; ÁNGULO DE INCIDENCIA DE 45° [31]. REMARCADOS SE OBSERVAN GRANOS GRANDES CON ALGUNAS MICROFISURAS Y GRANDES CLUSTERS, QUE A LA POSTRE SON DE DIFÍCIL FRAGMENTACIÓN Y REMOCIÓN	52
FIGURA 1-14. RECUBRIMIENTO BASE WC NK07; ÁNGULO DE INCIDENCIA DE 45° [31]. SE APRECIAN GRANDES DESPRENDIMIENTOS DE MATERIAL DENTRO DE LA ESTRUCTURA DEL MATERIAL	53
FIGURA 1-15. RECUBRIMIENTO BASE WC MARS11A; ÁNGULO DE INCIDENCIA DE 90° PARTÍCULAS EROSIVAS DE ALÚMINA [31]. SE OBSERVAN CONSIDERABLES DESPRENDIMIENTOS DE MATERIAL EN DIFERENTES ZONAS	53
FIGURA 1-16. RECUBRIMIENTO BASE WC NQ07; ÁNGULO DE INCIDENCIA 45° PARTÍCULAS EROSIVAS ALÚMINA [31]. MARCAS DE ARADO SOBRE LA SUPERFICIE DE TRABAJO	54
FIGURA 1-17. RECUBRIMIENTO ALLOY 56 C 0,6% CR16% EROSIONADO CON ALÚMINA. [29]	56
FIGURA 1-18. RECUBRIMIENTO ALLOY 56 C 0,6% CR 16% EROSIONADO CON SÍLICA. [29]	56
FIGURA 1-19. SUPERFICIE TÍPICA DE NIQUEL COMERCIAL EROSIONADA CON PARTÍCULAS DE AL2O3 DE 130µM Y A DOS ÁNGULOS DE INCIDENCIA. A) 20°. B) 90°. LA VELOCIDAD DEL EROSIVO FUE 53,8M/s. [74]	58
FIGURA 1-20. MICROGRAFÍAS MOSTRANDO EROSIÓN SECUENCIAL DE ALUMINIO 7075-T6	59
FIGURA 1-21. MICROGRAFÍAS SUPERFICIES DE POLÍMEROS ÁNGULO DE INCIDENCIA 90°. [12]	60
FIGURA 1-22. MICROGRAFÍAS SUPERFICIES DE POLÍMEROS ÁNGULO DE INCIDENCIA 90° [12]	61
FIGURA 1-23. MICROGRAFÍAS SUPERFICIE POLÍMERO ÁNGULO DE INCIDENCIA A)90° B)30° [12]	61
FIGURA 1-24. MICROGRAFÍAS POLÍMEROS SOMETIDOS A VELOCIDAD Y ÁNGULO MEDIO [12]	62
FIGURA 1-25. CURVA DE EROSIÓN PARA SiC/AL [38]	63
FIGURA 1-26. MICROSCOPIO METALOGRAFÍCO [43]	66
FIGURA 1-27. IMAGEN PARA LA PERLITA Y FERRITA 90%-10% [43]	67
FIGURA 1-28. ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN ÓPTICA [48]	70
FIGURA 1-29. ANÁLISIS POR ESPECTROMETRÍA INFRARROJA PARA POLISILOXANOS	71
FIGURA 2-1. ESQUEMA DE ZONAS DE VELOCIDAD UTILIZADAS EN EL EXPERIMENTO	73
FIGURA 2-2. DISTRIBUCIÓN DEL EXPERIMENTO ALREDEDOR DE LA CAMARA DE MOLIENDA	74
FIGURA 2-3. PERFIL DE VELOCIDADES DEL FLUJO DE GASES AL INTERIOR DEL MOLINO	75
FIGURA 2-4. LÁMINA RECUBIERTA POR SOLDADURA REFERENCIA “CDP 4666”	78
FIGURA 2-5. LÁMINA “HARDOX 400” [50]	79
FIGURA 2-6. EQUIPO “VICTOR THERMAL DINAMICS CUTMASTER 102”	79
FIGURA 2-7. PISTOLA PARA APLICACIÓN DE SILICONA	80

FIGURA 2-8. DESENGRASANTE INDUSTRIAL REFERENCIA “T5 TOUGH”	80
FIGURA 2-9. MOLDE EN BALSO PARA FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	81
FIGURA 2-10. RESINA EPÓXICA DE LOCTITE “DUREPOXI”	81
FIGURA 2-11. BALANZA “SARTORIUS ED2245”	82
FIGURA 2-12. SILICONA “LOCTITE SI 596 RD”	82
FIGURA 2-13. MUESTRAS DE LÁMINA TERMOTRATADA.....	83
FIGURA 2-14. MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO DE SILICONA.....	84
FIGURA 2-15. PESAJE INICIAL DE UNIDADES MUESTRALES EN BALANZA.....	84
FIGURA 2-16. ALISTAMIENTO DE UNIDADES MUESTRALES Y MONTAJE EN POSICIONES SELECCIONADAS.	86
FIGURA 2-17. FOTOGRAFÍA UNIDADES INSTALADAS EN EL MOLINO ANTES DEL DESMONTAJE.....	87
FIGURA 2-18. PESAJE FINAL DE UNIDADES MUESTRALES EN BALANZA.....	89
FIGURA 2-19. ESTEREOSCOPIO OLYMPUS SZX12.....	90
FIGURA 2-20. CORTADORA MARCA BUEHLER SAMPLEMET, ABRASIVE CUTTER.....	91
FIGURA 2-21. MUESTRAS LISTAS PARA QUE SEA APLICADA LA RESINA.....	91
FIGURA 2-22. EQUIPO SEM FEI QUANTA 200.....	92
FIGURA 2-23. A) DURÓMETRO WILSON, MODELO 3TTBB. B) DURÓMETRO REX MODELO B-1.....	93
FIGURA 3-1. PERFIL DE VELOCIDAD DEL FLUJO DE EROSIVO. INFORMACIÓN DE PROCESO.....	103
FIGURA 3-2. DIMENSIONES CÁLCULO DEL DIÁMETRO EQUIVALENTE.....	105
FIGURA 3-3. TASA DE EROSIÓN/DESGASTE R GR/TON).....	107
FIGURA 3-4. FOTOGRAFÍA LÁMINAS MUESTRALES GRUPO 2,5 Y 8.....	108
FIGURA 3-5. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 4.....	109
FIGURA 3-6. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 1 Y 2.....	109
FIGURA 3-7. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 5 Y 7.....	110
FIGURA 3-8. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 3 Y 8.....	110
FIGURA 3-9. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 4.....	111
FIGURA 3-10. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 1 Y 2.....	111
FIGURA 3-11. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 5 Y 7.....	112
FIGURA 3-12. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 3 Y 8.....	112
FIGURA 3-13. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA POLIMÉRICA GRUPO 4.	113
FIGURA 3-14. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA POLIMÉRICA GRUPO 1 Y 2.....	113
FIGURA 3-15. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA POLIMÉRICA GRUPO 5 Y 7.....	114
FIGURA 3-16. FOTOGRAFÍA PROBETA, LÁMINA POLIMÉRICA GRUPO 3 Y 8.....	114
FIGURA 3-17. METALOGRAFÍAS LÁMINA RECUBIERTA CON SOLDADURA	115
FIGURA 3-18. MICROGRAFÍAS SUPERFICIE DE TRABAJO DE RECUBRIMIENTO CON SOLDADURA	116
FIGURA 3-19. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 4.....	117
FIGURA 3-20. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 1.....	117
FIGURA 3-21. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 2.....	118
FIGURA 3-22. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 5.....	118
FIGURA 3-23. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 7.....	119
FIGURA 3-24. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 3.....	119
FIGURA 3-25. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 8.....	120
FIGURA 3-26. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 4.....	120
FIGURA 3-27. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 1.....	121
FIGURA 3-28. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 2.....	121
FIGURA 3-29. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 5.....	122
FIGURA 3-30. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 7.....	122

FIGURA 3-31. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 3.....	123
FIGURA 3-32. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA, LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 8.....	123
FIGURA 3-33. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 4.....	124
FIGURA 3-34. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 1.....	124
FIGURA 3-35. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 2.....	125
FIGURA 3-36. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 5.....	125
FIGURA 3-37. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 7.....	126
FIGURA 3-38. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 3.....	126
FIGURA 3-39. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA POLIMÉRICA GRUPO 8.....	127
FIGURA 3-40. ZONAS MICROESTRUCTURALES PARA MEDICIÓN DE MICRODUREZA.....	129
FIGURA 3-41. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA PARA MATERIAL POLIMÉRICO.....	132
FIGURA 3-42. EFICIENCIA DE LA EROSIÓN.....	133
FIGURA 3-43. GRÁFICAS DE RESIDUALES SUPUESTOS DE NORMALIDAD Y HOMOGENEIDAD TOTAL....	135
FIGURA 3-44. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES ANOVA TODOS LOS TRATAMIENTOS.....	136
FIGURA 3-45. GRÁFICAS DE RESIDUALES SUPUESTOS DE NORMALIDAD Y HOMOGENEIDAD VEL B....	137
FIGURA 3-46. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES ANOVA TRATAMIENTOS VEL BAJA.....	139
FIGURA 3-47. GRÁFICAS DE RESIDUALES SUPUESTOS DE NORMALIDAD Y HOMOGENEIDAD VEL M....	141
FIGURA 3-48. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES ANOVA TRATAMIENTOS VEL MEDIA.....	142
FIGURA 3-49. GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES ANOVA TRATAMIENTOS VEL MEDIA Y ALTA.....	143
FIGURA 3-50. COMPARACIÓN GRAFICA ENTRE MATERIALES DE LOS GRUPOS 1,2,5,7.....	144
FIGURA 3-51. COMPARACIÓN GRAFICA ENTRE MATERIALES DE LOS GRUPOS 1,2,5,7 Y 4.....	145
FIGURA 4-1. FOTOGRAFÍA SEM GRUPO 2 Y GRUPO 3.....	149
FIGURA 4-2. FOTOGRAFÍA SEM DE UNA ALEACIÓN EROSIONADA CR23%. [26].....	153
FIGURA 4-3. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 7 A 1200X.....	153
FIGURA 4-4. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA LÁMINA RECUBIERTA GRUPO 1.....	154
FIGURA 4-5. FOTOGRAFÍA SEM PROBETA LÁMINA TERMOTRATADA GRUPO 7.....	155
FIGURA 4-6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE EROSIÓN PRESENTADA POR PARTÍCULAS EROSIVAS DURAS [52].....	155
FIGURA 4-7. MICROESTRUCTURAS DE RECUBRIMIENTO FE-CR-C.....	156
FIGURA 4-8. MICROESTRUCTURA RECUBRIMIENTO FE-C-CR. A) MORFOLOGÍA DE FASE TIPO DENDRÍTICO. B) MORFOLOGÍA DE FASE TIPO HEXAGONAL.....	157
FIGURA 4-9. INTERFASE ENTRE MATERIAL BASE Y RECUBRIMIENTO DURO.....	158
FIGURA 4-10. FORMACIÓN DE CARBUROS SOBRE LÍMITES DE FUSIÓN DE CORDONES DE SOLDADURA	158
FIGURA 4-11. MICROESTRUCTURA DE LÍMITE DE FUSIÓN ENTRE CORDONES.....	159
FIGURA 4-12. MICROGRAFÍA TRANSVERSAL DEL CORDÓN DE REVESTIMIENTO.....	159
FIGURA 4-13. MICROESTRUCTURA DE BORDE, RECUBRIMIENTO FE-C-CR.....	161
FIGURA 4-14. MICROGRAFÍAS PROBETA LÁMINA TERMOTRATADA A) AL INTERIOR DEL MATERIAL Y B) DE LA SUPERFICIE DE TRABAJO.....	162
FIGURA 4-15. FOTOGRAFÍA SEM POLÍMERO EROSIONADO. [59].....	163

LISTA DE TABLAS

TABLA 1-1: COMPOSICIÓN QUÍMICA PUZOLANA NATURAL [7].	25
TABLA 2-1: RESULTADO EXPERIMENTO PREVIO AL PROYECTO ACTUAL.	76
TABLA 2-2. COMPOSICIÓN QUÍMICA NOMINAL DE LÁMINA “HARDOX 400” [50].	79
TABLA 2-3. GRUPOS DE MUESTRAS CON LA UBICACIÓN ALEATORIZADA DENTRO DE CADA GRUPO.	85
TABLA 2-4. UNIDADES MUESTRALES DEFINITIVAS INSTALADAS.	86
TABLA 2-5. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MOLINO.	88
TABLA 2-6. MATERIAS PRIMAS USADAS EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO.	88
TABLA 3-1. PESOS INICIALES PARA MUESTRAS TERMOTRATADAS.	94
TABLA 3-2. PESOS INICIALES PARA MUESTRAS RECUBIERTAS CON SOLDADURA.	95
TABLA 3-3. PESOS INICIALES PARA MUESTRAS POLIMÉRICAS.	95
TABLA 3-4. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 1.	96
TABLA 3-5. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 2.	97
TABLA 3-6. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 3.	98
TABLA 3-7. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 4.	99
TABLA 3-8. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 5.	1020
TABLA 3-9. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 7.	101
TABLA 3-10. RESUMEN DE PESOS PARA MUESTRAS GRUPO 8.	102
TABLA 3-11. DUREZA DE PARTICULAS QUE COMPONEN EL FLUJO EROSIVO.	1026
TABLA 3-12. TASA DE EROSIÓN PARA LÁMINA RECUBIERTA, TERMOTRATADA Y POLIMÉRICA. ...	106
TABLA 3-13. MEDICIONES DUREZA PROBETAS METÁLICAS, POSTERIOR REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO.	128
TABLA 3-14. MEDICIONES DE DUREZA PROBETAS POLIMÉRICAS.	128
TABLA 3-15. RESULTADOS ESPECTROSCOPIA.	131
TABLA 3-16. ANÁLISIS ANOVA PARA TODOS LOS TRATAMIENTOS.	135
TABLA 3-17. ANÁLISIS ANOVA PARA LOS TRATAMIENTOS A VELOCIDAD BAJA.	138
TABLA 3-18. ANÁLISIS ANOVA PARA LOS TRATAMIENTOS A VELOCIDAD MEDIA.	141
TABLA 3-19. PRUEVA DE COMPARACION DE TUKEY MATERIALES GRUPOS 1,2,5,7.	144
TABLA 3-20. PRUEVA DE COMPARACION DE TUKEY MATERIALES GRUPOS 1,2,5,7 Y 4.	144

Lista de Anexos

ANEXO A. Fichas Técnicas de Silicona Utilizadas en Ensayos Preliminares.....	166
ANEXO B. Resultados Pruebas Preliminares Siliconas y Acero Ni-hard.....	172
ANEXO C. Distribución Granulométrica Típica en un Molino de Cemento.....	173
ANEXO D. Tabla de Composición y Durezas de algunos Materiales Recubiertos.....	174
ANEXO E. Características de los Principales Ensayos de Dureza.....	175
ANEXO F. Fotografías Generales Finales de las Unidades Experimentales.....	177
ANEXO G. Fotografías de Análisis Estereoscópicos.....	210
ANEXO H. Fotografías de Análisis SEM por Grupos Experimentales.....	246
ANEXO I. Fotografías de Análisis Metalográfico.....	257

Introducción

A nivel industrial y a lo largo de muchos años, la facilidad para realizar las actividades de mantenimiento, los costos de mantenimiento, temas relacionados con seguridad industrial y optimización de procesos se han venido constituyendo en pilares de la gestión de las operaciones alrededor del mundo. El hecho de que los diferentes activos cumplan su función adecuadamente con la menor inversión de recursos posibles ha sido un reto que a nivel de ingeniería de procesos y mantenimiento se han traducido en investigación y desarrollos que han marcado hitos muy significativos con el paso del tiempo. La industria de la fabricación de cemento no es la excepción y por ello, la búsqueda continua de materiales que puedan hacer frente a uno de los problemas más relevantes dentro de este segmento, el desgaste de superficies debido a la erosión ó abrasión dentro del proceso, se ha convertido en un reto de alto impacto y por tanto de gran relevancia.

La interacción de los diversos materiales con variables de proceso tan agrestes como la temperatura elevada, la humedad y las mismas características de las materias primas naturales (cuarzo, alúmina, puzolana) y las artificiales (Clinker) en cuanto a dureza y su efecto sobre las superficies, convierten a la molienda de cemento en una de las principales generadores de desgaste mecánico severo.

Materiales de diversas características han sido implementados con el pasar de los años como alternativas razonables en términos de protección, pero que aún están lejos de satisfacer del todo condiciones como se mencionaban anteriormente de mantenibilidad, seguridad industrial y costo entre otras, siendo muy importante continuar en la búsqueda de mejores y apropiadas soluciones.

Si bien, no es la primera vez que se investiga en torno a materiales antidesgaste en molinos verticales, si es la primera vez que se hace un análisis sobre los posibles mecanismos de falla presentes sobre los materiales que recubren el cuerpo de la cámara de molienda y aún más importante que teniendo los polímeros innumerables propiedades, no se ha investigado en profundidad su pertinencia para estas aplicaciones y se plantea esta investigación como el punto de partida de un trabajo que sea desarrollado en esa vía, todo con el ánimo de tomar el máximo provecho de su versatilidad en cuanto a composición, variedad, desempeño y muchas otras características que seguro permitirán encontrar la respuesta a las inquietudes planteadas.

Esta investigación surgió a partir de observaciones puntuales del autor, las cuales fueron realizadas en equipos del proceso dentro de la industria, aplicando silicona RTV en la voluta de un

ventilador, otra aplicación en el eje de un separador dinámico, en los cuales se pudo observar que luego de 3000 horas de operación la silicona no había sufrido deterioro aparente mientras que la lámina recubierta utilizada justo en la posición contigua si lo evidenció.

Posterior a las observaciones anteriormente descritas, se realizó una prueba empírica de cuatro materiales, uno de ellos, una aleación al Ni-Cr, conocido industrialmente como Ni-Hard, y comúnmente utilizado como protección antidesgaste, y los otros tres de origen polimérico, siendo tres tipos diferentes de siliconas, una de ellas la silicona RTV 596 de Loctite, un sellante adhesivo de alto desempeño, de color rojo y cuya característica principal es el trabajo a temperaturas hasta de 315°C y la cual fue observada previamente y utilizada de manera empírica pero con excelentes resultados antidesgaste en una aplicación de Recubrimiento en las esquinas de la voluta de un ventilador. La otra silicona, una silicona transparente para trabajos de mampostería y trabajo a temperatura ambiente. Finalmente, la silicona 5699 de Loctite, una pasta utilizada para rellenar imperfecciones y curado a temperatura ambiente (Ver fichas técnicas de las siliconas en el anexo A). Los cuatro materiales fueron sometidos a chorro de arena, con boquilla de 10mm, presión de aire de 6 bar y tamaño de abrasivo de 200-500 μm . Los tratamientos (definidos empíricamente) a los cuales fueron sometidos los cuatro materiales fueron el tiempo de exposición al chorro y el ángulo de incidencia del chorro, siendo los niveles de cada uno de ellos 5 minutos y 20 minutos para el caso de tiempo de exposición y , 30° y 45° para el caso del ángulo de incidencia.

Como resultado de estos trabajos empíricos previos se pudo concluir que efectivamente pudiera establecerse un trabajo formal de investigación dadas las observaciones y por tanto surgió este proyecto de investigación como el primer paso para desarrollar un estudio formal en esa dirección; en el Anexo B pueden verse los resultados de estas pruebas preliminares, los cuales dan una orientación sobre el comportamiento de dichos materiales, siendo la silicona del tipo RTV la que mejor desempeño presentó al finalizar el experimento, dada su mejor estabilidad en términos de variación de dureza y menor pérdida de peso.

El experimento previo fue desarrollado teniendo en cuenta una velocidad fija, un ángulo fijo y un tiempo de exposición fijo para el Ni-Hard y una variación en el ángulo de impacto del erosivo para las siliconas y una variación en el tiempo de exposición para las siliconas, esto por las posibilidades limitadas para la realización del experimento.

En conjunto con personal de Holcim Colombia se definió realizar la experimentación en las paredes de la cámara de molienda de un molino vertical, equipo principal para la producción de cemento, con condiciones de mantenibilidad extremas y, en donde los costos de mantenimiento y las condiciones de seguridad impactan en alto grado la operación de este proceso.

En el primer capítulo de este documento se hace un recorrido por el proceso de fabricación de cemento, las materias primas, los materiales antidesgaste que fueron utilizados, algunos conceptos sobre desgaste erosivo y teoría sobre caracterización de mecanismos de desgaste.

El segundo capítulo describe el diseño experimental, todo lo relacionado con la ejecución del experimento en sí, el cual fue desarrollado al interior del molino vertical, con condiciones de operación reales y durante más de 1000 horas de operación continuas. También se describen las diferentes técnicas de caracterización que se emplearon para realizar los análisis posteriores al desmontaje del experimento y el propósito que se perseguía con la realización de dichos análisis.

En el capítulo tres, se incorporaron todos los resultados obtenidos luego de realizar la caracterización de las probetas; así mismo es de resaltar que se presentaron también como resultados los cálculos, tablas, gráficas, fotografías y otros derivados de los análisis realizados a partir de la caracterización y/o de temas teóricos requeridos para la discusión.

En el capítulo cuatro se presentó un análisis de los resultados y una discusión en cuanto a éstos con respecto a los objetivos propuestos y así mismo en cuanto a la concordancia con lo esperado a partir de la literatura existente.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentaron unas conclusiones posteriores a los análisis y a la discusión, en donde se pretendió establecer claridad en relación con el desempeño y los mecanismos de desgaste de los diferentes materiales utilizados en el proceso.

1. Marco Teórico

1.1 Proceso de Molienda de Cemento

Las diversas materias primas que componen el cemento deben ser reducidas en su tamaño hasta la pulverización, siendo el proceso de molturación en la industria del cemento el que consume la mayor cantidad de energía, con valores cercanos al 65% del total de la energía absorbida en el proceso de fabricación de cemento (aproximadamente entre 100 y 110 kWh/t). Alrededor del 40% de dicha porción es utilizada en la molturación del Clinker. [1]

Las finuras del material final que se persiguen luego del proceso de molienda, y que deben ser reportadas luego de ejecutar las pruebas de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C430 [93] y cuyos valores deben estar entre el 12% y el 15% de material retenido en malla de 45 μm ; en el Anexo C, se puede encontrar la distribución de tamaños de las partículas erosivas presentes en el flujo de gases dentro del molino. Para llegar a estas condiciones se requiere hacer uso de las dos fuerzas de molturación principales conocidas, las cuales son la compresión y el impacto, apoyadas en los dos casos por las fuerzas de fricción. Dentro de los molinos verticales, el proceso es conducido principalmente por fuerzas de compresión y de fricción. Muchas variables deben tenerse en cuenta para que el proceso se realice de manera eficiente, entre las cuales están las propiedades del material, el tamaño de partículas y la adecuada selección de la maquinaria de molturación.

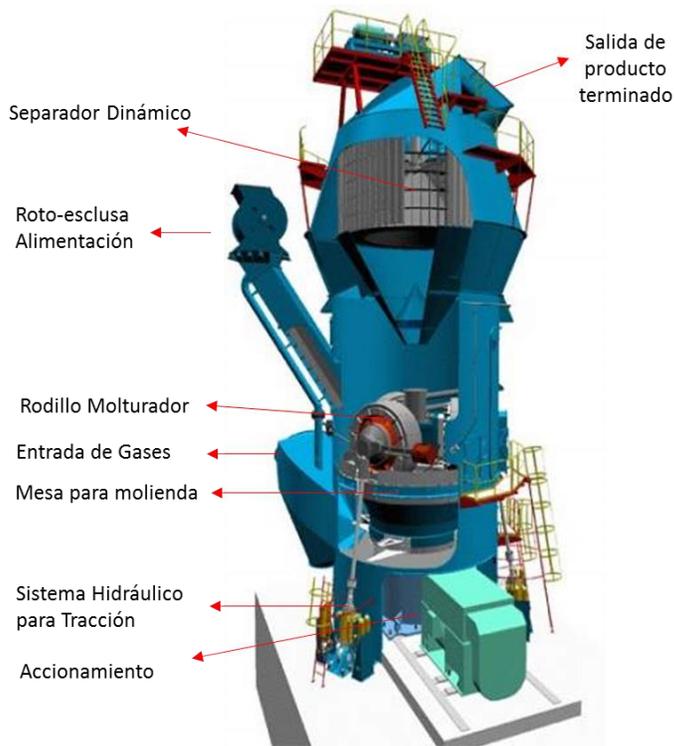
Para desarrollar este proceso, existen diferentes equipamientos, entre los cuales se cuentan los molinos horizontales ó de bolas, los molinos verticales con rodillos (desde 2 hasta 6) y algunas prensas de rodillos, siendo la eficiencia normal de los molinos verticales oscilante entre el 7% – 15%, siendo superior a las prensas de rodillos y aún a los molinos tubulares, en donde la eficiencia oscila entre el 1% y el 2%. [2]

1.2 Molinos Verticales

Los molinos verticales Figura 1-1, son equipos comúnmente utilizados en la industria cementera, los cuales varían en su tamaño, con mesas de molienda que oscilan normalmente entre los 2 metros y los 6 metros de diámetro y que varían también en número de rodillos molturadores, pudiendo tener desde 2, hasta 6 unidades. Es utilizado para moler carbón, harina cruda y cemento

(Clinker más aditivos), siendo su proceso interno solamente estándar para condiciones particulares y definidas en cada caso, pues la naturaleza de los minerales que son pasados a través de su interior simultáneamente es muy variada. Como ejemplo, podemos tomar un proceso común de fabricación de harina cruda, que incorpora 4 diversos minerales tales como la caliza, la arcilla, el cuarzo, el mineral de hierro Fe_2O y la alúmina Al_2O_3 , todos ellos con diferente cohesión, distribución de tamaño de partículas y nivel de dureza muy variado. [3]

Figura 1-0-1. Molino Vertical F.L. Smidth



Por su parte, en el proceso de molienda de cemento, simultáneamente puede haber Clinker, yeso, puzolana, caliza, escoria entre otros, manteniendo estos también las mismas diferencias en sus características físicas y químicas mencionadas anteriormente.

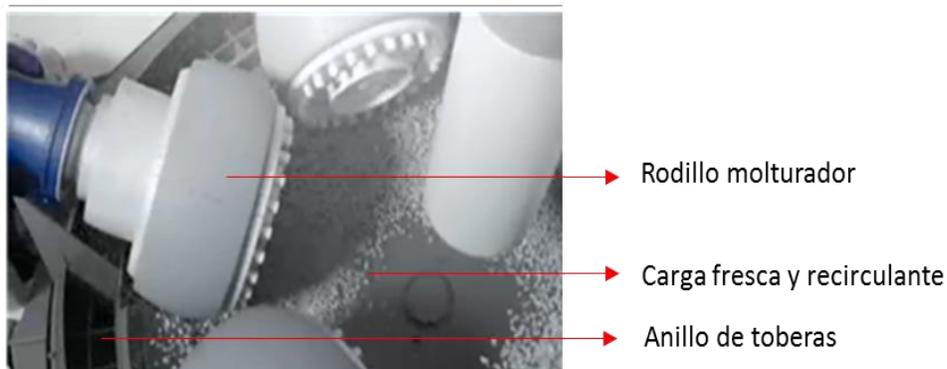
Debido al aprovechamiento de la fuerza centrífuga, normalmente la mesa de molienda trabaja a velocidades que oscilan entre las 20 rpm y las 40 rpm, esto dependiendo del diseño particular del producto.

El sistema de transmisión está compuesto por un motor que acopla a un reductor normalmente del tipo planetario, cuya flecha está acoplada a la mesa de molienda. Los rodillos giran gracias a fuerzas de fricción establecidas cuando el material sobre la mesa hace contacto con la superficie de cada uno de los rodillos. La fuerza de molienda (compresión sobre la cama de molienda) es complementaria y se logra por la acción entre el peso propio de cada rodillo y, fuerzas de compresión de tipo hidráulico. [3]

Una de las razones por las cuales fueron desarrollados los molinos verticales, fue por la búsqueda constante de la reducción de consumo energético en el proceso de molienda. Contrario a los molinos tubulares ó de bolas (40 kWh/t), el molino vertical tiene un consumo específico de energía que puede llegar a ser de aproximadamente 11 kWh/t y adicionalmente su tecnología permite realizar 4 funciones importantísimas dentro del proceso que de otro modo y en los molinos tubulares, deben hacerse con equipamiento y obras civiles adicionales, las cuales son la molturación en sí misma que se realiza entre la mesa y los rodillos, el secado del material mediante transferencia térmica entre gases calientes y el material en proceso, los cuales son inyectados al molino desde el exterior, el transporte hacia el separador y la separación del material entre producto terminado y producto que debe ser reincorporado al molino para ser reprocesado. [2]

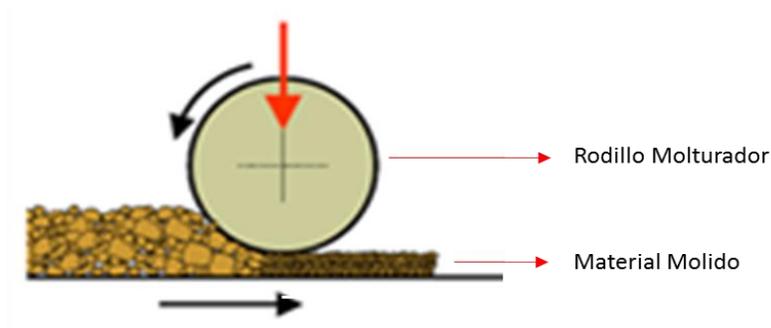
A partir de las consideraciones anteriores, el proceso de molienda en un molino vertical empieza con la alimentación de material húmedo hacia el interior del molino, la cual es direccionada hacia el centro de la mesa de molienda en donde se suma a una carga re circulante de material (entre la cual se cuenta la rechazada en el proceso de separación) Figura 1-2.

Figura 1-0-2. Disposición de Elementos Internos



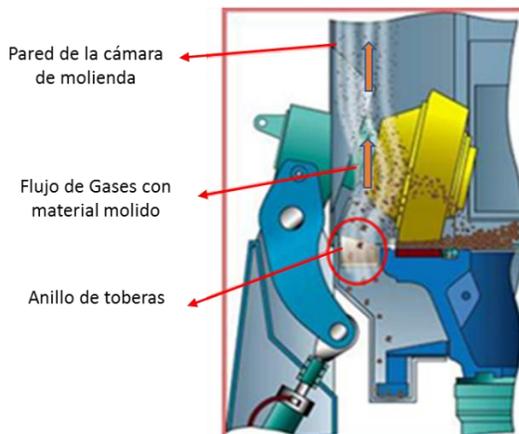
Debido a la rotación de la mesa de molienda, la fuerza centrífuga desplaza el material hacia los extremos de la mesa, debiendo pasar por debajo de los rodillos, Figura 1-3, en donde las fuerzas que mencionamos anteriormente hacen que el material sea fragmentado y posteriormente continúe su curso hacia el borde de la mesa, en donde es arrastrado por un flujo de aire vertical que pasa a través de un anillo perimetral de toberas y luego asciende paralelo a las paredes de la cámara de molienda hasta un separador dinámico ubicado en la parte superior del equipo Figura 1-4. Las partículas gruesas caen nuevamente sobre la mesa de molienda, algunas que no son elevadas por su tamaño, pasan a una zona de recuperación por debajo de la mesa y transportadas para ser reintroducidas desde el exterior nuevamente al proceso, y las más finas son transportadas hacia el separador para ser clasificadas. [2]

Figura 1- 0-3. Proceso Gráfico de Molturación



En particular, este trabajo fue realizado en un molino para cemento OK 36, fabricado por la compañía FLSmidth, ubicado en la planta de Holcim Colombia, en Nobsa Boyacá.

Figura 1-0-4. Flujo de Gas al Interior del Molino

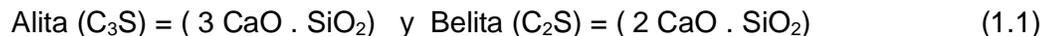


1.3 Materias primas para la fabricación de cemento

1.3.1. Clinker

El Clinker es una materia prima sintética que sumada al yeso y algunos otros minerales dan origen al cemento. El Clinker es obtenido por la fusión dentro de un horno de clinkerización de una mezcla de caliza, mineral de hierro y en algunos casos alúmina en diferentes proporciones, a temperaturas entre los 2000 °C y los 2100 °C, seguidas de un enfriamiento rápido hasta temperaturas cercanas y por debajo de los 200 °C. [5]

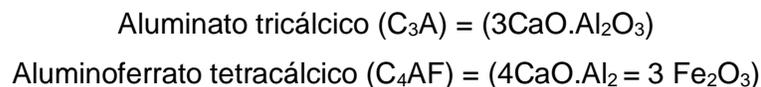
Este proceso, permite que se den reacciones químicas entre los diferentes minerales, siendo los constituyentes principales posteriores al proceso descritos en la Ecuación:



Que al tener las estructuras provenientes de silicatos, son los que aportan la resistencia y dureza al material, dados los enlaces de tipo covalente en su mayoría. La Alita y la Belita son polimórficas, y cada una de sus estructuras cristalinas ha venido estudiándose con el paso de los años, aunque con muchas dificultades dadas las múltiples posibilidades de variación en sus parámetros de conformación, tales como la temperatura, composición de materias primas, control de proceso y quemabilidad, entre otras. [5]

Experimentalmente se ha comprobado que hay una interrelación entre la Alita y la Belita cuando se habla de dureza al impacto y es que al incrementar la cantidad de C₂S, se incrementa la fragmentación al impacto, mientras que dicha rotura decrece en la medida que se incrementa el C₃S. [1]

Sin embargo, al rededor del proceso también se obtienen otros minerales, tales como:



Los cuales no tienen mayor influencia sobre la molturabilidad.

El Clinker y las características de sus constituyentes están influenciados totalmente por las propiedades de cada una de sus materias primas, la molienda, la preparación de la mezcla ingresada al horno, el piroproceso y por supuesto el enfriamiento; a su vez la proporción relativa de estos componentes, y sus arreglos microestructurales, predominantemente proporcionan las características de molturabilidad y otras de cada tipo de clinker, que dado todo lo anterior en todos los casos tiene variaciones aunque estas vayan desde casi imperceptibles hasta muy grandes. [1]

1.3.2. Pozulana

La puzolana es un mineral de origen natural ó artificial, cuyo mayor constituyente es el silicio, aunque también pueden tener origen sílico-aluminoso. Se utilizan comúnmente en el proceso de molienda de cemento, gracias a que debido a su inestabilidad química pueden reaccionar fácilmente con la cal libre presente en el Clinker.

La proporción de la puzolana entre las materias primas para la elaboración del cemento está en el intervalo del 20% al 40%, lo que en principio es un gran avance, dado que es mucho más económica de obtener que el Clinker, además mucho más fácil de moler. En cuanto a las características físicas, reduce el calor generado durante la hidratación del cemento y, evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva ó compresiva al hidratar o secar la cal libre del Clinker respectivamente. Finalmente, reduce los aluminatos y absorbe álcalis que de otra forma reaccionarían negativamente con los aditivos del concreto.

La composición química de las puzolanas naturales se puede apreciar en la Tabla 1-1:

Tabla 1-1: Composición química puzolana natural [7].

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)
Puzolana Volcánica	57,4	15,8	5,5	4,7	2,1	3,2	3,1	0,3
Puzolana Sedimentaria	50	16	9	6,5	6	4	4	0

Las puzolanas naturales tienen una estructura amorfa y con grano fino y se consiguen normalmente en lugares donde hay acumulaciones de cenizas volcánicas, las cuales son ricas en cuarzo (SiO_2) y en feldespato. También se pueden encontrar en rocas o minerales ricos en sílice hidratada, que se asientan en yacimientos submarinos.

Por otro lado, las puzolanas artificiales deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado, siendo éstas, subproductos de algunas operaciones industriales tales como residuos de bauxita, polvos de chimeneas de los altos hornos, ó cenizas volantes entre otros. [7]

1.3.3. Cuarzo

El cuarzo, como se denomina comúnmente a la Sílice (SiO_2), es el mineral más abundante en la naturaleza, con un proceso de cristalización perfecto y extremadamente puro, no presenta características plásticas. Normalmente se le obtiene a partir de algún tipo de arena, de las cuales es su principal constituyente. El Cuarzo, en forma de cristales, cambia su estructura a los 573 °C, momento a partir del cual cambia su volumen cristalizando en sistemas monoclinicos o rómbicos. [8] Es la estructura más compacta de la sílice y esto hace que posea una alta densidad específica (2,65 gr/cm) y un índice de dureza de 7. [6]

1.3.4. Yeso

El yeso por su parte, es un mineral que se presenta en cristales de tipo monoclinicos, que son en la normalidad incoloros. Se obtiene la mayor parte del tiempo en forma de anhídrita CaSO_4 cuya cristalografía es rómbica. Es un mineral muy poco soluble en el agua y con muy baja dureza, alrededor de 2 en la escala de Mohs. Es la materia prima más blanda de las cuales se usan para la fabricación del cemento. [4]

1.4 Desgaste de materiales

El desgaste en los materiales se puede definir como el proceso mediante el cual hay pérdida de material de una o de ambas superficies que se encuentren en contacto, en el momento en el cual, estas se encuentran en movimiento relativo una de la otra.

Esta pérdida de material está predeterminada por las condiciones de operación propias del sistema, dado que el desgaste ó la resistencia al desgaste no son propiedades de los materiales; el sistema incluye los cuerpos en contacto, el tipo de contacto y el entorno que enmarca la interacción correspondiente. [10]

La norma DIN EN 50320:1979-12, enmarca de manera referencial los diferentes mecanismos de pérdida de material, definiendo cuatro principales que son: fatiga, adhesión, abrasión y pérdidas por reacciones triboquímicas, mientras que algunos otros como lo son la erosión, picaduras, cavitación, entre otros, están incorporados ó son una combinación a partir de los cuatro principales. En el caso particular de la erosión, ésta se presenta debido a la abrasión (remoción de material por causa de “rayaduras” sobre la superficie) y, a la fatiga superficial (formación de grietas en regiones superficiales debido a ciclos de esfuerzo que producen desprendimiento posterior del material) ó a la combinación de las dos.

1.5 Erosión por la acción de partículas sólidas

La erosión por causa de partículas sólidas, es un proceso dinámico que ocurre en diferentes partes de las máquinas o sus componentes, debido a la interacción mecánica entre partículas sólidas que son proyectadas sobre una superficie dentro de un entorno operacional, las cuales golpean y rebotan sobre la superficie y cuya fuerza sobre el material proviene de su desaceleración. Es así que la exposición de los diferentes componentes indudablemente conlleva a remoción de material y a degradación superficial. De manera similar que otros procesos tribológicos, la erosión de partículas sólidas es también necesariamente un proceso que combina cargas mecánicas, algunas veces incluyendo cargas térmicas, reacciones químicas y físicas, entre las mismas partes envueltas en dicho sistema tribológico. [8,11]

La erosión de partículas sólidas manifiesta adelgazamiento de componentes, cambio de la rugosidad superficial, degradación superficial, socavaciones macroscópicas y en apariencia, reducción de la vida funcional de la estructura. De allí que la erosión por partículas sólidas ha sido considerada como un serio problema y se le ha hecho responsable por muchas fallas en aplicaciones ingenieriles. [12]

Se ha encontrado un creciente número de aplicaciones de los polímeros y sus compuestos, en áreas donde las superficies son sujetas a erosión por partículas sólidas. La influencia de los parámetros relacionados con el experimento tales como el ángulo de impacto, la velocidad de impacto, la forma, dureza y tipo de erosivo, y de otro lado las propiedades relacionadas con el objetivo tales como resistencia, ductilidad, cristalinidad, densidad de las cadenas constitutivas del polímero, contenido de refuerzos y arreglo microestructural, son abiertamente los que marcan el comportamiento de los materiales en erosión por partículas sólidas [12]

Para el caso de los aceros sin embargo, aun cuando la dureza puede aumentar drásticamente por tratamientos térmicos, no se ha podido evidenciar que ello mejore la resistencia a la erosión. Es importante resaltar que desde el punto de vista técnico y tecnológico, varios autores han demostrado que la tasa de erosión a nivel fijo es casi independiente de la dureza de los aceros, incluso a veces la tasa de erosión aumenta ligeramente con el incremento de H, aunque con consideraciones específicas [89] [90]. A nivel microestructural, Levy y Jahanmir [91] pudieron observar que al tratar térmicamente acero 1075 para formar perlita fina y gruesa, ó incluso carburos esféricos, el material exhibía un comportamiento dúctil y bajo estas condiciones se producía un ligero aumento de la erosión al aumentar la dureza misma.

Si bien para la mayoría de los casos el concepto se mantiene, en los casos en los cuales hay indicios de que el endurecimiento superficial ayuda a reducir levemente la tasa de erosión E, principalmente ligado al cambio en el ángulo de incidencia [92].

1.6 Variables que dominan el efecto erosivo

Se denomina partículas erosivas a todas aquellas partículas, flujo de partículas ó medio que causa el efecto de pérdida de material a través de su interacción con determinados materiales de componentes de máquina. Según Finnie [67], las variables que afectan a la erosión pura pueden separarse ampliamente en tres tipos: variables de impacto que describen el flujo de partículas, variables de partículas y variables materiales. Las variables de incidencia primarias son la velocidad de la partícula (v), el ángulo de incidencia (α) y el flujo (concentración de partículas). En este trabajo se detallarán algunas de las más significativas.

1.6.1.Partículas Erosivas

Variaciones en el tamaño de partícula y su forma, pueden causar cambios fundamentales en la respuesta de erosión [13]. De allí que si las partículas de erosivo no son afiladas o son esféricas, se favorece la deformación plástica, mientras que si son afiladas, entonces el corte y la fragmentación frágil son muy acentuadas. Se asume que la tasa de erosión es independiente del tamaño de partícula por encima de un valor crítico, el cual se encuentra entre 100 y 200 μm ; sin embargo depende de las condiciones de exposición y la interacción entre partícula y objetivo [14] [84]. Gane y Cox [85], [86] realizaron pruebas de microdureza y de indentación para corroborar ello, adicionado a estudios recientes que han determinado que la tasa de erosión E no es siempre constante para tamaños de partícula erosiva superiores a las 100 μm .

En este proceso los modelos computacionales han sido fundamentales para poder encontrar una buena concordancia entre las velocidades de rebote y las dimensiones iniciales de los cráteres [80] [81] [82] [83]. Se ha encontrado principalmente que la erosión en estado estacionario por partículas esféricas aparentemente desarrollan generalmente una topografía de superficie de colinas y valles, la cual es diferente a la topografía superficial producida por partículas angulares, las cuales proporcionan mayores tasas de erosión que las partículas con formas redondeadas.

Algunas partículas resultan embebidas, lo cual ocurre en el momento en el que el vector de la velocidad de incidencia se alinea con el eje mayor de la partícula de erosivo en el caso de partículas con determinada angularidad, esto debido a que la mayor cantidad de energía cinética incidente, da lugar a la penetración de partículas en lugar de que ésta sea consumida en la rotación por algún tipo de rebote en el momento del impacto [15]. La energía cinética incidente a su vez es influenciada por acción del coeficiente de fricción entre los materiales del sistema, aun cuando éste es independiente del tamaño de partícula y ángulo de incidencia.

Para el caso de las partículas esféricas, estas son embebidas solamente cuando el ángulo de incidencia alcanza hasta 85° y si la penetración dentro del sustrato es al menos igual a su radio, tal que suficiente material se desplace alrededor de la partícula previniendo su eyección por las fuerzas elásticas [16].

A 90° , la fuerza máxima de impacto normal a la superficie, se obtiene sumando las fuerzas de reacción en las regiones de deformación elástica y plástica, cuando la partícula se ha detenido, la cual a su vez se asume como fuerza de rebote y la cual es suficientemente alta como para vencer las fuerzas friccionales y se hace improbable que partículas permanezcan embebidas sobre la superficie del sustrato. [11]

Se ha determinado experimentalmente que la tasa de deformación se incrementa al tener un flujo de material erosivo con partículas muy pequeñas, contrario a cuando se tienen partículas grandes, lo cual incrementa los esfuerzos sobre el material cuando es bombardeado por partículas muy pequeñas. De otro lado, menor número de partículas de mayor tamaño alcanzan la superficie objetivo por unidad de peso del erosivo, cuando las partículas impactan, por tanto, partículas más grandes se hacen menos efectivas y a su vez disminuye la tasa de erosión.

El efecto de la dureza del erosivo depende en gran manera de la naturaleza dúctil ó frágil del material objetivo. Para el caso de modo frágil, el efecto de la dureza de partícula es mucho más pronunciado que para el caso del modo dúctil; sin embargo en realidad no es fácil aislar completamente la dureza de las partículas erosivas de otras variables tales como la forma ó el contorno; por ejemplo, si la partícula es dura pero relativamente sin filos, no se causará desgaste erosivo severo [13]. Es de importancia eso si reforzar el concepto mediante el cual, la tasa de erosión disminuye cuando la dureza de la partícula decrece por debajo de la dureza del material que se está erosionando [87]

1.6.2. Ángulo de Impacto

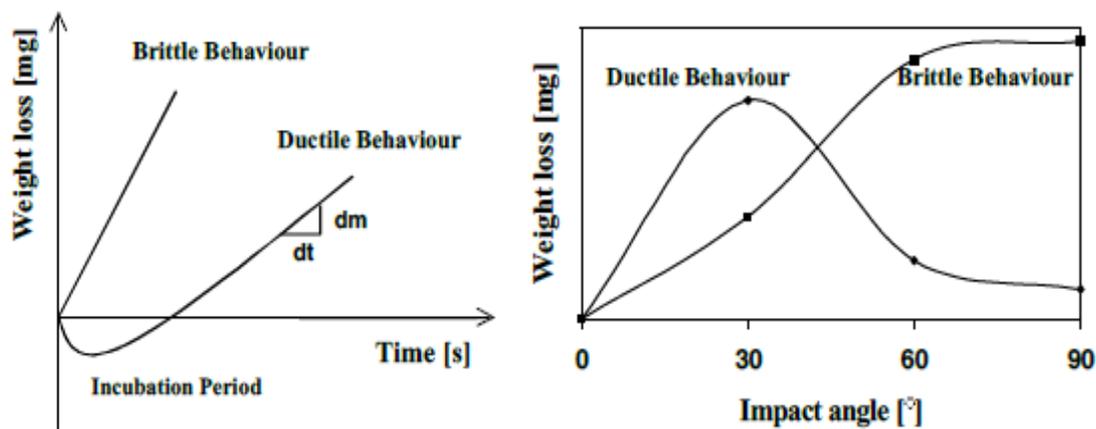
El ángulo de impacto " α " se define como el ángulo entre la dirección de la partícula incidente y la superficie de la partícula. Con respecto al ángulo de Impacto, la erosión de partículas sólidas se divide en:

Erosión con ángulos de impacto normales, en donde el ángulo de impacto es aproximadamente 90° y Erosión con ángulos de impacto oblicuos, en donde el ángulo de impacto está entre 0° y 90° [17]

Un ángulo de impacto bajo, favorece el proceso de desgaste similar a la abrasión, dado que las partículas tienden a desplazarse a lo largo de la superficie después del impacto. En el caso de ángulos de impacto grandes, provocarán mecanismos de desgaste típicos de erosión de partículas sólidas.

Una gran diferencia en la clasificación de varios materiales con respecto al desgaste erosivo existe, cuando es relacionado al ángulo de impacto y el tiempo de impacto y su interrelación se puede ver claramente en la Figura 1-5. Para el caso del mecanismo erosivo, los materiales son ampliamente clasificados como dúctiles o frágiles, siendo los dúctiles caracterizados por tener su máxima tasa de erosión a un bajo ángulo de incidencia. Por otro lado, se considera frágil si la máxima tasa de erosión se presenta a un ángulo de impacto alrededor de los 90°. [12]

Figura 1-0-5 Curvas Típicas de Desgaste Erosivo [8]



Con relación al tiempo, se suceden diferentes etapas dentro del proceso de erosión típica y son mostradas vs la acumulación de peso del material erosivo que incide sobre la probeta, tal como se muestra en la Figura 1-6.

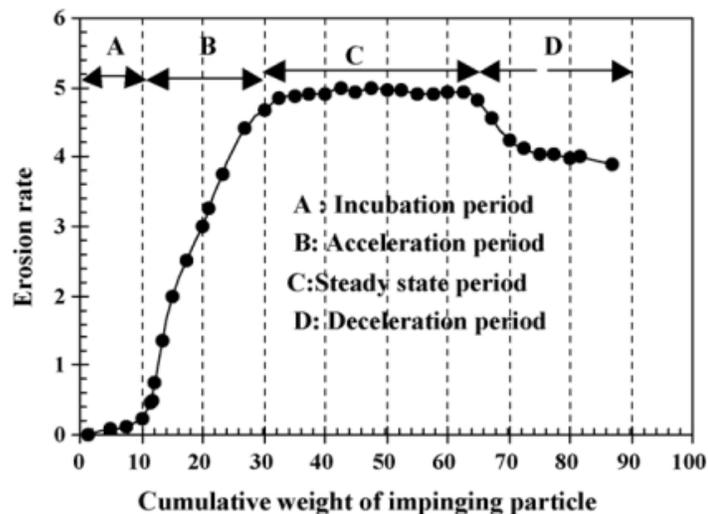
El proceso de inducción o incubación es el período en donde no hay pérdida de peso o tan solo un valor muy bajo. Sin embargo algunas veces incluso hay una pequeña ganancia de peso.

El período de aceleración es el período durante el cual la tasa de erosión se incrementa muy rápido hasta un punto llamado pico de la tasa de erosión.

El período de estabilización presenta una tasa de erosión casi constante.

El período de desaceleración es el período en el cual la tasa de erosión decrece y rápidamente incorpora un período de incubación, en el cual el peso del objetivo aparentemente se incrementa antes de establecerse un estado estable. [12]

Figura 1-0-6. Acumulación de peso del material erosivo contra el tiempo [12]



Para impacto normal, esto sucede debido a incrustaciones iniciales de partículas en la superficie del objetivo. Posterior a la remoción de estas partículas, una erosión estable se establece [18,19]. Al observar los impactos durante el período de incubación otro proceso se puede identificar; dado que la energía del impacto es disipada en gran medida generando rugosidades sobre la superficie. Este proceso, en polímeros incluye un alto grado de deformación plástica del polímero bajo esfuerzos de tensión y compresión. [8]

1.6.3. Velocidad de las partículas de erosivo

La velocidad de la partícula erosiva tiene un efecto muy grande en el proceso de desgaste. Si las velocidades son bajas, por debajo de los 30m/s, los esfuerzos al impacto son insuficientes para que haya deformación plástica y el proceso de desgaste sucede por fatiga superficial. [13]. Cuando la velocidad se incrementa, el material erosionado puede deformarse plásticamente tras el impacto de las partículas; en este caso, el desgaste es causado por deformación plástica repetitiva.

En la respuesta del desgaste frágil, el desgaste sucede por microfisuración de la superficie. A muy altas velocidades puede sucederse inclusive fusión sobre la superficie impactada.

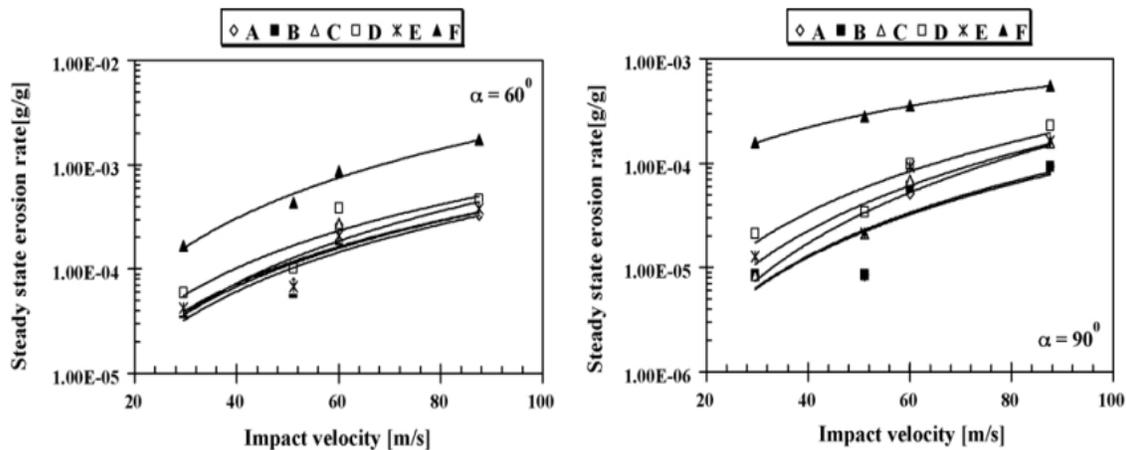
Cuando se tienen velocidades entre medias y altas, una ley puede describir la relación entre la tasa de desgaste y la velocidad de impacto, Ecuación (1.2):

$$E = kv^n \quad (1.2) \quad [12]$$

En donde E es la tasa de erosión en estado estable, v es la velocidad de impacto, n es un exponente relacionado con la velocidad y k es una constante.

Por ejemplo, en la Figura 1-7 puede apreciarse una correlación directa entre la tasa de erosión y la velocidad a diferentes ángulos de incidencia en diferentes polímeros.

Figura 1-0-7. Tasa de erosión vs velocidad [12]



1.6.4. Flujo de partículas de erosivo

Es la cantidad de masa que impacta el material por unidad de área y tiempo. La tasa de desgaste erosivo es proporcional al flujo hasta cierto umbral, el cual está delimitado por las partículas que rebotan y las que están impactando. Este límite está entre los 100 kg/m²s para los elastómeros hasta los 10000 kg/m²s para erosión en metales. La tasa de desgaste decrece ligeramente cuando el límite de flujo se excede [13].

Pruebas de erosión estándar han demostrado que con una alta cantidad de material erosivo, el desgaste es lineal con respecto al incremento de peso del erosivo, y es mayor en tanto que aumenta el tamaño de grano del material [20]. Anand et al. [88] demostraron que debido a la interferencia de las partículas rebotantes con las partículas incidentes, la superficie estará efectivamente protegida, y lo cual resulta en que la tasa de erosión E disminuye exponencialmente al aumentar el flujo. El efecto aumenta con la disminución de la velocidad o el tamaño de las partículas y depende del material por causa del efecto de la velocidad de rebote, la cual afecta el tiempo durante el cual las partículas de rebote protegen la superficie.

1.6.4.1 Número de Reynolds

En la mecánica de fluidos, se presenta un fenómeno en el cual el fluido se desplaza en determinadas direcciones, básicamente influenciadas por las fuerzas de corte que resisten el desplazamiento de las moléculas de dicho fluido. A partir de este concepto, aquellos fluidos cuyo movimiento se da en finas capas ó láminas ordenadas que se deslizan una sobre la inmediatamente siguiente se denominan de flujo laminar, mientras que aquellos fluidos cuyas partículas tienen movimientos muy erráticos, con un intercambio de cantidades de movimiento violento y transversal, se denominan de flujo turbulento.

El número de Reynolds es un número adimensional que involucra diversas variables que se relacionan e influyen en la forma de movimiento de las partículas del fluido, siendo la viscosidad determinante para este aspecto, ya que en términos generales son las fuerzas viscosas las que se oponen a dicho movimiento. [21]

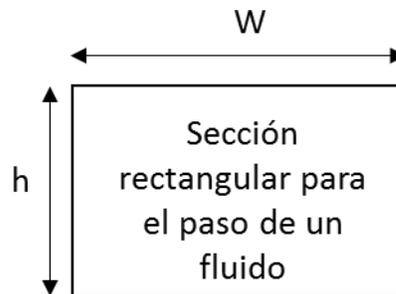
Dichas variables, están relacionadas en la ecuación de Reynolds, la cual se expresa en la Ecuación (1.3):

$$R = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (1.3) \quad [21]$$

En donde: v = velocidad del fluido
 d = sección a través de la cual pasa el fluido
 ρ = densidad del fluido
 μ = viscosidad dinámica

Siendo la velocidad, la densidad y la sección, variables relacionadas con la inercia y, la viscosidad la variable que influenciará la oposición al movimiento.

Para los casos en los cuales los ductos no tienen sección circular, se calcula un diámetro equivalente a partir del área de la sección de paso (A) y su perímetro mojado (P). Si la sección es rectangular, el diámetro equivalente se calculará de la siguiente manera:



De donde, $A = W \times h$; y, $P = W + W + h + h$

Por tanto, el diámetro equivalente será, Ecuación (1.4):

$$d_{eq} = \frac{4A}{P} \quad (1.4) \quad [22]$$

A partir de la aplicación de dicha ecuación, se ha determinado que fluidos con $R < 2000$, se consideran laminares; en este caso, las fuerzas viscosas son grandes y por tanto predominan sobre los esfuerzos cortantes.

Los fluidos cuyo número de Reynolds está dentro del intervalo $2000 < R < 4000$ se consideran en régimen de transición.

Los fluidos cuyo $R > 4000$ son considerados en régimen turbulento y significa que los efectos viscosos son relativamente bajos y hay posibilidad de movimiento libre de partículas de fluido.

Así las cosas, si las condiciones físicas intrínsecas del fluido se mantienen, tales como la viscosidad y la densidad, se puede evidenciar entonces que el comportamiento del fluido será determinado por la velocidad y la distancia sobre la cual éste actúe. [23]

1.6.5. Eficiencia de la erosión

El cálculo de la eficiencia de la erosión es la evaluación del proceso de remoción de material de una superficie, mediante uno ó varios mecanismos de desgaste, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales sujetos a erosión y teniendo en cuenta variables relacionadas con los materiales que se utilizan como erosivos y puede ser utilizada para identificar la respuesta dúctil o frágil del material a partículas sólidas de erosión. Puede ser obtenida a partir de la Ecuación (1.5):

$$h = 2EH/\delta v^2 \quad (1.5) \quad [12]$$

Donde E es la tasa estable de erosión, H es la dureza, δ es la densidad del material objetivo y v es la velocidad de impacto.

En el microrayado (microarado) ideal, se presenta simplemente desplazamiento de material sin ninguna fractura y por lo tanto no hay erosión, de allí que la eficiencia de la erosión es 0. Alternativamente, en caso del microcorte ideal, h es 1.

Cuando la erosión ocurre por la formación de una rayadura con subsecuente fractura, la eficiencia de erosión estará en el rango entre 0 y 1. En contraste, con material frágil si la erosión toma lugar por desprendimiento de material y la eliminación de trozos grandes, se dará lugar a un h mayor a 100%. Se espera entonces que en la medida que incrementa la velocidad de impacto, la eficiencia de erosión disminuirá [12]. Los materiales dúctiles, como los metales puros, tienen una tasa de erosión máxima, E, con ángulos de incidencia bajos (típicamente de 15 ° a 30 °), mientras que para materiales frágiles, como la cerámica, el máximo es de 90 ° o cerca de este [68].

1.7 Fenómenos presentes durante la erosión de partícula sólida

Durante la erosión se presentan fenómenos de corte, impacto y fatiga. La concentración de energía del material erosivo en la superficie impactada, depende de las características de las partículas erosivas, tales como tamaño, forma, dureza, masa, etc. Aparte de estos factores, el ángulo de impacto, velocidad y flujo de material erosivo tienen crucial importancia.

El golpe de la partícula erosiva corresponde a una fuerza de impacto sobre la superficie objetivo; durante dicho impacto, la energía inicial de la partícula se convierte en diferentes tipos de energía, tal como se explica a continuación:

1.7.1. Impacto elástico normal

La energía inicial de la partícula es reconvertida en energía elástica y durante el rebote nuevamente en energía cinética de la partícula. En el caso de los polímeros, el desgaste erosivo ocurre solo después del tiempo y en la medida que avanza la descomposición térmica (para el caso de los polímeros). En ese momento, el desgarro ó la separación de las macromoléculas es el resultado del impacto con partículas de bordes afilados. Prevalece el impacto elástico cuando materiales con alta resistencia y duros son impactados con partículas de energía inicial baja (baja velocidad y baja masa de las partículas erosivas). [8]

1.7.2. Impacto plástico normal

Este caso no es muy común en la práctica, debido a que la mayor cantidad de energía no se convierte en deformación plástica sin iniciación de fractura.

1.7.3. Impacto elasto/plástico normal

Cierta cantidad de la energía inicial permanece en uno o ambos elementos involucrados en el impacto en forma de energía plástica, mientras que gran cantidad de la energía inicial es convertida en calor por fricción interna. La energía cinética de la partícula rebotada es disminuida progresivamente. Un simple impacto generalmente no causa fractura, es mediante impactos repetitivos y de muchas partículas en el mismo lugar que pueden causar “dislocaciones” desde el sitio del impacto. Después de que la deformación total excede la

resistencia, pequeñas microfracturas se desarrollan al interior del material, lo cual posteriormente ocasionará que el material sea removido.

La cantidad de energía plástica depende de las propiedades del material objetivo y de las partículas erosivas. En tanto sea menor la ductilidad de los materiales sobre los cuales sucede el impacto, menor será el número de ciclos antes de la falla y por tanto más grande la energía que conlleva fractura. Esto es obvio si se tiene como base la comparación entre materiales con propiedades dúctiles y frágiles, en donde los últimos muestra un alto comportamiento de desgaste erosivo cuando la energía inicial de la partícula que impacta, es suficiente para generar esfuerzos que exceden la resistencia del material. Gran ductilidad minimiza la fuerza del impacto y consecuentemente los esfuerzos. [8]

1.7.4. Impacto elasto/plástico oblicuo

Este es uno de los tipos de impacto que más se encuentran. Este difiere del impacto normal, debido a la aparición de mecanismos tales como microcortes ó microarado.

El material es deformado de manera similar a la condición de impacto con ángulo de 90°, solamente que se adiciona corte y arado particularmente causado por materiales erosivos con formas afiladas. El microcorte y microarado está relacionado en su gran mayoría con la dureza de las partículas erosivas, las cuales pueden penetrar en las superficies objetivos.

A elevados ángulos de impacto, un flujo de partículas erosivas suave causa principalmente microfisuración, mientras que un abrasivo duro causará deformación plástica. [8]

La cantidad de material removido durante la erosión, depende de varios factores que se interrelacionan e incluyen propiedades y estructuras del material objetivo, condiciones de macroexposición y microexposición, así como características físicas y químicas de las partículas erosivas.

Todos estos factores, que normalmente exceden los 20, resultan en tasas de erosión que son determinadas por combinaciones específicas y dado que en la realidad diferentes procesos ocurren simultáneamente durante la erosión. [8]

Es claro que en la mayoría de los materiales, y en mayor grado en los polímeros, la dureza por sí sola no controla su característica de desgaste erosivo; antes bien, una combinación de alta resistencia a la tensión y última elongación a la fractura bien lograda, hace que el material posea alta energía de fractura o en general alta resistencia contra la iniciación de fisuras y propagación bajo fatiga y/o condiciones de carga de impacto. [12]

1.8 Tasa de erosión

La erosión se identifica claramente y a simple vista por la degradación superficial del material. Esta degradación superficial se evidencia con la remoción de material y el cual es medido mediante balanzas de precisión. Probetas de prueba son colocadas en los lugares en donde se desea establecer las tasas de desgaste y a partir de la diferencia entre los pesos iniciales y finales luego de ser sometidos al proceso erosivo, se puede determinar la tasa de erosión, que básicamente se calcula a partir de la Ecuación (1.6):

$$R = \text{delta de peso} / \text{partícula impactada} \quad (1.6)$$

Sin embargo, en el caso de materiales que tienen diferentes densidades, se hace una modificación a la ecuación, siendo entonces la tasa de erosión calculada en función del volumen perdido de material, con respecto a la masa impactada, Ecuación (1.7):

$$R = \text{Vol de masa perdido} / \text{masa impactada} \quad (1.7)$$

La tasa de erosión R (mm^3/kg) puede ser definido por el volumen perdido, durante el período de erosión estable y dividido por la masa de material probado [24]

En el caso de la industria de la fabricación del cemento, se tiene definida la tasa de desgaste como la relación que hay entre la pérdida de peso del material con respecto a la cantidad de material procesado $R = (\text{gr}/\text{ton})$; esto medido para cualquiera de los equipos de fabricación de cemento y sometidos a desgaste, tales como martillos ó barras para el caso de trituradoras, Recubrimientos ó elementos de recambio para rodillos y mesa en molinos verticales, en el caso de molinos de bolas se hace control sobre rejillas y placas de fondo de entrada, de levante y de clasificación.

La eliminación de material en materiales dúctiles implica un flujo plástico considerable, mientras que en materiales frágiles la fractura es de importancia primordial, al menos para ángulos de incidencia mayores. Las teorías predicen que R debería ser inversamente proporcional a la dureza de los metales, mientras que para las cerámicas debería haber una dependencia mucho más débil de la dureza, pero la tenacidad a la fractura debería ser importante. La mayoría de las teorías predicen además ningún efecto del tamaño de partícula para los metales, aunque a menudo se observa que R aumenta fuertemente con el tamaño de partícula, al menos hasta aproximadamente 100 μm [68].

1.9 Materiales antidesgaste

La correcta selección de materiales resistentes al desgaste puede evitar tiempo perdido por reparaciones tempranas y de ese modo disminuir los costos de mantenimiento e incrementar el desempeño de las líneas de producción. En este proyecto se utilizaron tres materiales con diferentes características, dos de ellos metálicos; el primero fue un material con un recubrimiento antidesgaste depositado por arco sumergido, y caracterizado por carburos de Cromo enriquecidos con carburos de Niobio y de Boro, con una dureza aproximada de 60HRC. Por otro lado se utilizó una lámina endurecida mediante tratamientos térmicos, y cuya dureza está alrededor de los 40HRC. Finalmente se utilizó silicona RTV, como material polimérico, y seleccionada a partir de ensayos no estandarizados en aplicaciones industriales y con excelentes resultados aparentes.

1.9.1. Aceros de Carbono

1.9.1.1. Aceros al carbono

Los aceros al carbono, normalmente tienen a este elemento como principal elemento constitutivo, y admiten solamente cantidades mínimas de otros elementos tales como el Manganeso, normalmente en proporciones cercanas al 0,5%. Es bien sabido, sin embargo, que la resistencia de los aceros se incrementa proporcionalmente con el incremento del porcentaje de Carbono, dando lugar entonces a una clasificación especial teniendo en cuenta esta característica.

1.9.1.2. Aceros de Alto Carbono.

Presentan un contenido superior a 0,50% C son muy útiles para aplicaciones en las que se requieren altas resistencias, alta rigidez y alta dureza, tales como en las herramientas para corte, los resortes para vehículos, y en bastantes casos se utiliza en elementos sometidos a desgaste.

1.9.2. Materiales para recubrimientos

Los recubrimientos duros, son en esencia, películas ó capas de materiales diversos sobrepuestas a un metal base, que se emplean para mejorar las propiedades mecánicas frente al desgaste y con una consecuente elevación de su dureza. Para tal fin, se utilizan diversos materiales tales como los carburos de Titanio, de Wolframio, de Cromo, de Silicio, y de Niobio; los nitruros de Titanio y de Cromo ó los carbonitruros de Titanio; entre otros.

1.9.2.1. Carburos de Cromo

El Cromo y el Carbono se pueden alear para formar diferentes tipos de carburos, caracterizados todos por su alta dureza, gran resistencia y alta estabilidad química. Estos Carburos se arreglan en tres diferentes estructuras cristalinas que son, el Cr_{23}C_6 en el sistema cúbico, el Cr_7C_3 y Cr_3C_2 en el sistema ortorrómbico, siendo la última estructura la que mejores propiedades desarrolla en términos de dureza. Estos recubrimientos son muy útiles en aplicaciones con altas temperaturas, de ahí su gran utilización para ser depositados en capas gruesas, bien sea por soldadura ó por proyección térmica. [25]

1.9.2.2. Lámina recubierta por soldadura o proyección térmica

Se le denomina lámina bimetálica ó recubierta, dado que sobre una lámina de acero normal A36 ó lámina de hierro convencional, es depositada por soldadura una capa de recubrimiento que contiene una fundición de hierro blanca de alta aleación ó un CERMET, cuya microestructura es de carburos de características duras tales como los de Cromo, de Niobio, de Boro, de Tungsteno, de Vanadio, entre otros.

Las aleaciones de Alto Cromo presentan una resistencia a la erosión y a la abrasión incluso de hasta 20 y 25 veces por encima que la de los aceros normalizados, cuando las partículas

de erosivo son más suaves que los carburos correspondientes. Esto se atribuye a la presencia de una gran fracción de M_7C_3 en la microestructura. [26]

La lámina CDP 4666, fabricada por Eutectic Castolin, es una lámina recubierta con alta resistencia a la abrasión y a la erosión; sus dimensiones son correspondientes a un largo de 2740 mm , ancho 1220 mm y un espesor total de 8 mm, de los cuales 5 mm constituyen el material base de acero blando ó hierro templado y 3 mm que fueron sobrepuestos a dicho material base a través de un recubrimiento por la aplicación controlada de cordones de soldadura, conformada por alta densidad de partículas duras, provenientes de Carburos de Niobio y Carburos de Boro finamente dispersadas en una matriz de carburos de cromo, con una dureza de recubrimiento que varía entre los 62 HRC y los 65 HRC y para ser operada en ambientes con temperaturas hasta de 550°C [27]

1.9.3. Aceros aleados antiabrasión

Otro tipo de materiales desarrollados contra el desgaste, son los aceros aleados antiabrasión, que básicamente son aleaciones de bajo carbono mezcladas con ciertas proporciones de otros elementos tales como el Manganeso, el Cromo, el Molibdeno, el Vanadio, el Silicio, entre otros, algunos microaleantes como el Boro, el Niobio y el Titanio, así como contenidos de impurezas controladas y en muy bajas proporciones de Fosforo y Azufre.

Al ser el Carbono el elemento principal de la aleación, su incremento supone también aumento de la dureza pero disminución de la ductilidad, de ahí que se hace necesario realizar tratamientos térmicos, de modo que se pueda dar concentraciones de átomos de carbono en microestructuras más estables y equilibradas. Al suceder esto, se abre paso una nueva distribución atómica y por consiguiente una nueva microestructura, la cual puede modificarse de acuerdo con los requerimientos que requieran las prestaciones del material, variando la composición química y/o la velocidad de solidificación mediante el control de temperaturas.

Cada elemento de aleación permite desempeños diferentes, tal como se puede detallar a continuación:

1.9.3.1. Cromo

Si se adiciona en proporciones hasta del 4%, se logra incrementar la dureza, la elasticidad, la resistencia a la tracción y al desgaste, de ahí su uso en la fabricación de aceros para herramientas y palas industriales. Son mejores que el acero convencional en su desempeño frente a la abrasión.

1.9.3.2. Manganeso

Su aporte en proporciones superiores al 0,8% brinda una gran resistencia al desgaste y al impacto, razón por la cual son ampliamente utilizados en la construcción de blindajes, trituradoras, ruedas para locomotoras, etc. Sin embargo, cuando se adicionan proporciones entre el 11% y el 14% se obtiene un material conocido comercial e industrialmente como Hadfield, con elevada dureza, buena ductilidad y alta capacidad de endurecimiento por envejecimiento, lo cual lo hace ideal en aplicaciones con alto desgaste, sobretodo en minería.

1.9.3.3. Silicio

Es un elemento que evita la formación de carburos sin control, enriquece la Austenita en el Carbono provocando la formación de láminas de Bainita con Austenita retenida entre ellas, lo cual incrementa en gran proporción la tenacidad del material.

1.9.3.4. Níquel

Mejora la resistencia a la tracción y la tenacidad, así como la resistencia a la corrosión.

1.9.3.5. Molibdeno

Provoca incrementos en las propiedades mecánicas de los aceros, especialmente la dureza y tenacidad.

1.9.3.6. Vanadio

Inhibe el crecimiento de los granos, lo cual incrementa la resistencia y la tenacidad. También forma carburos, con su posterior mejora en la resistencia al desgaste. [28]

1.9.3.7. Lámina Termotratada

Es una lámina de acero (al manganeso-cromo), templada y revenida. No debe ser utilizada en aplicaciones en donde se generen temperaturas superiores a 250 °C en aras de no perder sus propiedades microestructurales y de superficie. Es una chapa antidesgaste con una dureza aproximada de 400 HB, Concebida para aplicaciones que exigen resistencia al desgaste junto a buenas propiedades para el conformado en frío. Hardox 400 presenta muy buena soldabilidad.

La resistencia al desgaste debería ser tomada como una propiedad del material y/o del sistema y su intensidad depende de las condiciones ambientales, materiales aplicados, y condiciones de operación. Muchos componentes de la industria cementera son sujetos a desgaste erosivo y abrasivo, tal como los álabes de ventiladores, cámaras de molienda, álabes de separadores dinámicos y en general cubiertas ó cerramientos para equipos que participan dentro de procesos con fluidos sólidos ó mixtos, en donde el proceso de desgaste es causado por finas partículas de material sólido abrasivo y aunque se han desarrollado mejoras en los tratamientos térmicos del acero para incrementar la dureza en una condición normalizada, solamente se han podido alcanzar efectos marginales en cuanto a la mejora en la resistencia al desgaste; este tipo de material es comúnmente conocido como láminas endurecidas térmicamente.

1.9.3.8. Lámina Recubierta con Soldadura

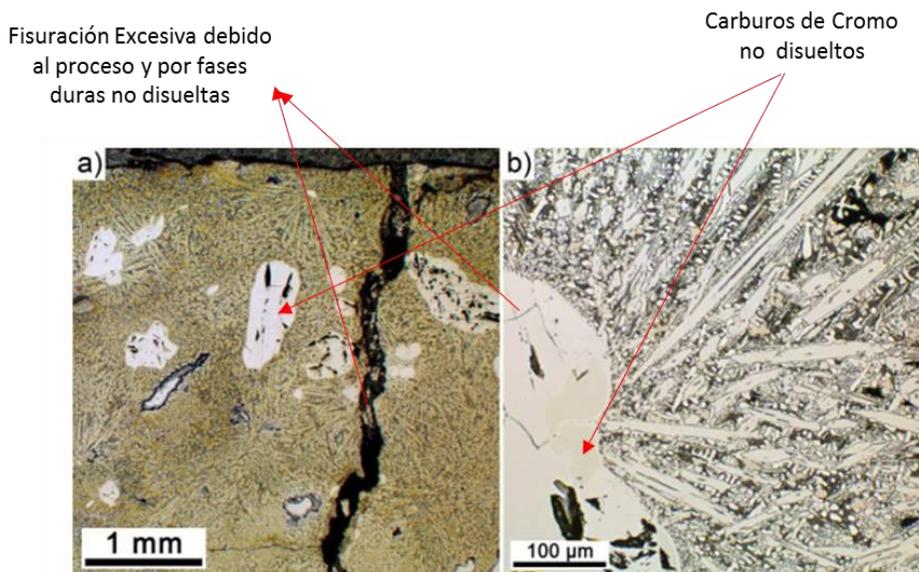
Otro método potencial para incrementar la durabilidad de los componentes sometidos a desgaste, es la aplicación de recubrimientos duros sobre una superficie base. Varias aleaciones son usadas para tal fin, pero las más importantes se catalogan dentro de tres grandes grupos de bases, Hierro, Cobalto y Níquel, recubiertas por carburos de Cobalto, Cromo, Tungsteno ó Boruros de Níquel. Es de anotar, que en múltiples investigaciones se ha comprobado que la resistencia al desgaste es mejorada con la adición de Cr en matrices dúctiles. [29,30]

La combinación de alta dureza y un buen rango de tenacidad a la fractura ha hecho, que los materiales endurecidos a base de carburos sean los preferidos para usos antidesgaste ó en presencia de tribocorrosión [31].

Los materiales que contienen grandes volúmenes de este tipo de aleaciones no son necesariamente los materiales más resistentes al desgaste por sí solos, sino que deben ser aleaciones bien seleccionadas y organizadas en microestructuras largas y finas. Dentro de esta gran cantidad de materiales, las aleaciones ferrosas son las preferidas dado su bajo costo en comparación con las base Cobalto ó Níquel. Sin embargo, ofrecen algunas desventajas dados sus procesos de fabricación. En el Anexo D se pueden observar la composición y dureza promedio de algunos de los recubrimientos antidesgaste existentes comercialmente.

A nivel microestructural se puede evidenciar una matriz hyper- eutéctica con largos carburos de Cr primarios incluso de hasta 10 μm de longitud tal como se ve en la Figura 1-8. Muchas fases FeCr no disueltas pueden ser detectadas, las cuales son adicionadas como reservas para la distribución de Cr durante el proceso de soldadura. Estas partículas son muy frágiles, lo cual resulta en muchas fracturas y fisuras dentro del ferrocromo. El Recubrimiento duro muestra también fracturas debido a liberación de esfuerzos que aparecen durante el enfriamiento después de la deposición de soldadura.

Figura 1-0-8. Microestructura hipereutéctica de depósito de soldadura antidesgaste, mostrando grandes carburos primarios de Cromo, FeCr.



Se ven grandes carburos primarios de Cromo. a)1mm, b)100 μm [32]

Sin embargo, esta microestructura es típica para Recubrimientos con depósitos vía soldadura por arco, en producción de gran escala y con elevadas tasas de enfriamiento. La dureza gradualmente se reduce en la medida que se incrementa la temperatura desde aproximadamente 900 HV10 hasta 400 HV10 a 800 °C de manera que entre menor sea la temperatura durante el proceso de soldadura, favorecerá un menor agrietamiento y por consiguiente un mejor comportamiento a desgaste en operación. [33]

Para microestructuras gruesas y heterogéneas, la dureza no puede ser considerada como única variable para la predicción del desgaste, sino que el contenido y las características de las precipitaciones de la fase dura tienen un papel esencial en el comportamiento a desgaste. Dentro de las características que más influyen en el correcto desempeño de estos recubrimientos en cuanto a resistencia a la erosión, están el volumen, el tamaño, la distribución y la forma de la fase dura. Es muy importante hacer notar que dichas propiedades se incrementan significativamente en la medida que se reduce el tamaño de los granos de carburo incluso a la escala nanométrica [29,30, 34].

De las características finales de los recubrimientos duros, dependerá su comportamiento posterior, incluso en algunos casos, partículas erosivas con bordes afilados (que pudieran causar un efecto negativo muy importante sobre las superficies sometidas a estos), no serían muy efectivas removiendo material para estas condiciones. La dureza de la sílica por ejemplo que oscila entre los 900 HV - 1100 HV y sus abrasivos pueden ser considerados relativamente suaves cuando actúan sobre precipitados duros. Los fragmentos del grano que impactan la superficie objetivo, resbalan a partir del punto de colisión causando desgastes insignificantes.

Las Figuras 1-9 y 1-10 muestran un comparativo de dos materiales, la alúmina y la sílica, sobre materiales de recubrimiento cuya composición, dureza y proceso de deposición se citan en el Anexo D, y que fueron sometidos a un proceso de erosión con diferentes ángulos de incidencia.

Figura 1-0-9. Desgaste erosivo para la alúmina en diferentes ángulos [29]

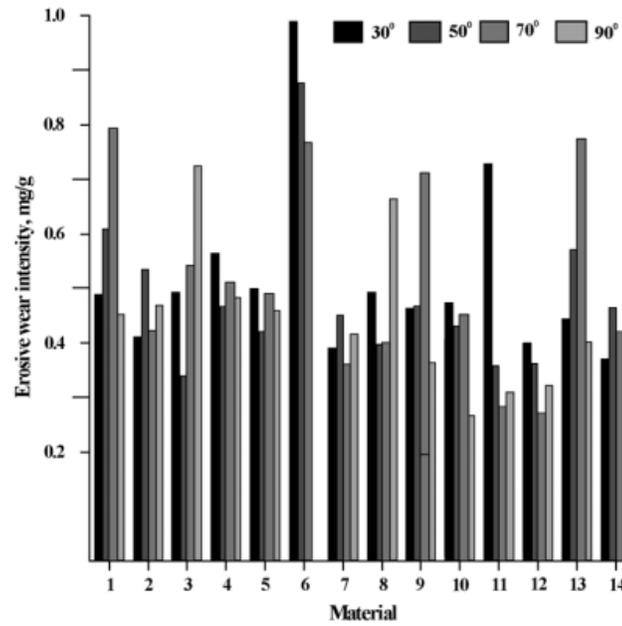
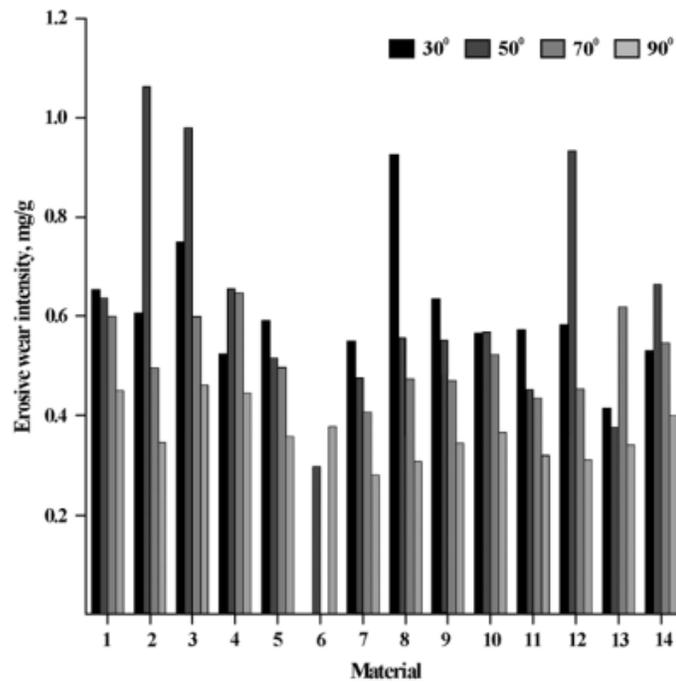


Figura 1-0-10. Desgaste erosivo para la sílice en diferentes ángulos [29]



Se puede evidenciar en las Figuras 1-9 y 1-10, que para la mayor cantidad de materiales al ser expuestos a la erosión tanto con alúmina como con sílica, la mayor intensidad de desgaste se presenta cuando se tienen ángulos de incidencia por debajo de los 70°.

En ese sentido, y corroborando la afirmación anterior, como ejemplo de ello, se ha podido establecer que para el acero grado 45 normalizado y con un ángulo de incidencia de 90°, la intensidad de desgaste erosivo es de 0,2644 mg/g cuando se usa alúmina y de 0,5157 mg/g para la sílica; por su parte cuando se aplica un flujo de partículas erosivas con un ángulo de incidencia oblicuo, los valores de intensidad de desgaste erosivo se incrementaron a 0,35248 mg/g y 0,598 mg/g respectivamente. [29]

1.9.4. Polímeros

Hoy en día, los polímeros y sus compuestos son ampliamente usados como materiales estructurales y antidesgaste en muchos componentes y sistemas de ingeniería, gracias a sus excelentes prestaciones tales como la densidad, la plasticidad, la dureza, el aislamiento ó la baja conductividad, la adhesión, entre muchas otras.

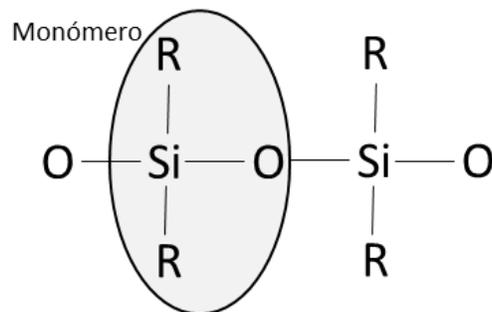
Los polímeros son materiales creados a partir de unidades simples llamadas monómeros, unidas y organizadas entre sí en estructuras lineales ó no lineales, que al final forman grandes moléculas con muy diferentes características; la forma constitutiva hace que se tenga la posibilidad de mejorar las propiedades deseadas a partir de la selección del monómero, el diseño de la estructura y el proceso de sintetización, dependiendo la aplicación particular para la cual se requiera el polímero en mención. Para ello también puede realizarse una mezcla de polímeros, permitiendo así ampliar de manera muy significativa el rango de posibilidades de acuerdo con las necesidades particulares.

En comparación con los metales, ellos ofrecen beneficios adicionales tales como un fácil procesamiento y facilidad para ser moldeados, especialmente los termoplásticos. [8]. Muchos ejemplos de la aplicación de compuestos poliméricos también pueden ser mencionados, tales como tuberías para transporte de lodos de perforación, arenas, álabes de rotores en helicópteros, álabes de impeler de bombas, vehículos de alta velocidad, aeronaves, turbinas de agua, componentes de misiles y muchas otras, en las cuales una de las características más importantes debe ser el desempeño ante erosión dado que para tales aplicaciones los ambientes son normalmente contaminados con partículas sólidas. [9,35]

1.9.4.1. Silicona

Las siliconas son polímeros termoestables e inorgánicos, ya que no tienen átomos de carbono a lo largo de su cadena principal. En otros términos, su cadena está compuesta por átomos de silicio y oxígeno que se suceden de manera alternada, de allí que su compuesto principal es el dióxido de silicio, uno de los elementos más abundantes de la naturaleza. Cada eslabón de la cadena tiene dos grupos unidos a la misma, que bien pueden ser incluso grupos orgánicos como se observa en la Figura 1-11.

Figura 1-0-11. Estructura química de la silicona



Las siliconas constituyen buenos elastómeros porque la cadena principal es muy flexible. Los enlaces entre un átomo de silicio y los dos átomos de oxígeno unidos, son altamente flexibles. El ángulo formado por estos enlaces, puede abrirse y cerrarse como si fuera una tijera, sin demasiados problemas. Esto hace que toda la cadena principal sea flexible.

Por su composición química de silicio y oxígeno, es flexible y suave al tacto, no mancha, no se desgasta en condiciones normales, no envejece, y puede adoptar formas y colores, tiene una baja conductividad térmica, y una baja reactividad química, no es compatible con el crecimiento microbiológico, posee resistencia al oxígeno, a la radiación de los rayos ultravioleta y al ozono, es altamente permeable a los gases a su temperatura ambiente de 25 °C.

La resistencia a la tracción de las siliconas está alrededor de los 70 kg/cm² manteniendo una elongación promedio de 400%, siendo estos valores estables aun después de largas exposiciones a temperaturas extremas dentro del rango -60 °C a 250 °C. La silicona reduce el coeficiente de fricción, de tal manera se consigue un factor de desgaste muy bajo y un límite PV más alto, en donde P es la carga que para el caso de desgaste se refiere a una presión específica y V es la velocidad de los cuerpos en contacto.

1.10 Mecanismos de falla

Las diferencias en las características de erosión pueden ser resumidas de acuerdo con los mecanismos de remoción de material, los cuales varían desde el desgarramiento y la fatiga, corte y formación de viruta para los polímeros y metales dúctiles, hasta formación de fisuras y fractura frágil para los cerámicos, vidrios y polímeros frágiles. [36]

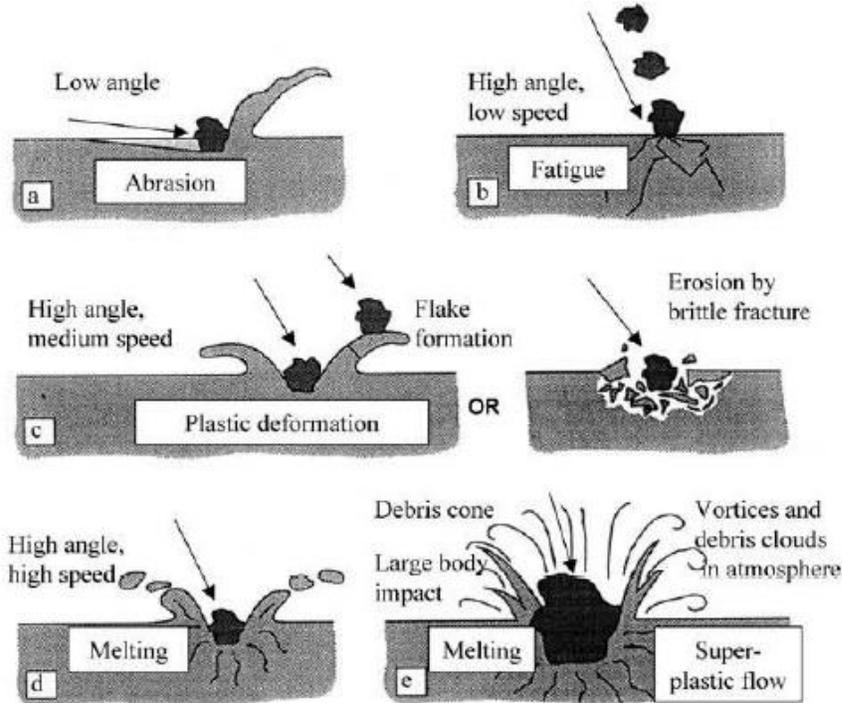
Las partículas deforman los materiales dúctiles debido a su movimiento perpendicular ó paralelo a la superficie, lo cual significa que los componentes de la velocidad tanto paralelos como perpendiculares transfieren la energía inicial en energía de deformación. Esta es una razón por la cual se presenta un incremento en la erosión de materiales que siguen el modo dúctil, pero a bajos ó medios ángulos de incidencia [8]. Las partículas sólidas que impactan los metales forman cráteres de impacto plástico y desplazan el material. Se ha demostrado que los impactos individuales de las esferas no eliminan material excepto por encima de una velocidad crítica bastante alta [69] y, que los impactos individuales de partículas angulares eliminan el material solo por una pequeña fracción de las posibles orientaciones de partículas [70, 71]. En la gran mayoría de los casos, no se produce la eliminación directa de material, pero un reborde de material permanece adherido al extremo del cráter.

Los materiales frágiles no son cortados fácilmente. La transferencia de energía paralela a la superficie puede darse solamente a través de las fuerzas de fricción, por tanto es pequeña. Solo el componente perpendicular de la velocidad o de la respectiva energía inicial determina la energía que va al material. El mecanismo de erosión es el mismo que en el caso del ángulo de 90°, en el cual es bien sabido que hay reducción del desgaste erosivo a menores ángulos de impacto. Si el coeficiente de fricción de los componentes del impacto es alto, entonces se espera que también la parte horizontal de la fuerza de impacto pueda transferir energía al material lo cual ocasionará desviaciones sobre el comportamiento de desgaste erosivo; la consecuencia es un incremento de los esfuerzos internos, los cuales a medios y altos ángulos de impacto causan un desgaste erosivo máximo. [8]

En la Figura 1-12 se puede apreciar un resumen gráfico de los diferentes procesos de erosión y los mecanismos de desgaste predominantes dependientes de la velocidad y el ángulo de incidencia, donde a) abrasión a bajos ángulos de impacto, b) fatiga superficial a baja velocidad y alto ángulo de impacto, c) fractura frágil o múltiple deformación plástica con

velocidad media, d) superficie fundida por una alta velocidad de impacto, e) erosión macroscópica con efectos secundarios.

Figura 1-0-12. Posibles mecanismos de erosión de partículas sólidas [13]



1.10.1. Mecanismos de falla durante la erosión de metales

En los metales, la erosión puede manifestarse principalmente mediante la eliminación directa de material por corte o micromecanizado por partículas duras y afiladas, ó por la deformación repetida del material que conduce a la fatiga y a su consecuente remoción, dependiente esto mismo también de la fragilidad ó ductilidad de la capa superficial del material objetivo que está siendo erosionado, siendo la tasa de erosión R inversamente proporcional a la dureza de la superficie; también es importante mencionar que, es probable que ambos fenómenos ocurran en proporciones variables [67].

1.10.1.1 Mecanismo de desgaste frágil

En metales, cuya metalografía indica presencia de granos grandes y duros, como en el caso de diferentes tipos de carburos, éstos tienden a fracturarse con facilidad, pero son menos

fácilmente removidos que los granos pequeños Figura 1-13. Un buen balance entre grano fino y mínima acumulación de posibles capas de granos, en general produce gran resistencia a la erosión, esto debido a que la remoción de clusters es mucho más difícil que la remoción de granos aislados, al punto que para este tipo de materiales, y con ángulos de incidencia de 90° el desprendimiento es mínimo y la microfisuración alta, mientras que para ángulos del orden de 45° la remoción es mayor por desprendimiento con una baja microfisuración subsuperficial Figura 1-14 y 1-15.

**Figura 1-0-13. Recubrimiento base WC mars6B; Ángulo de incidencia de 45° [31].
Remarcados se observan granos grandes con algunas microfisuras y grandes clusters, que a la postre son de difícil fragmentación y remoción**

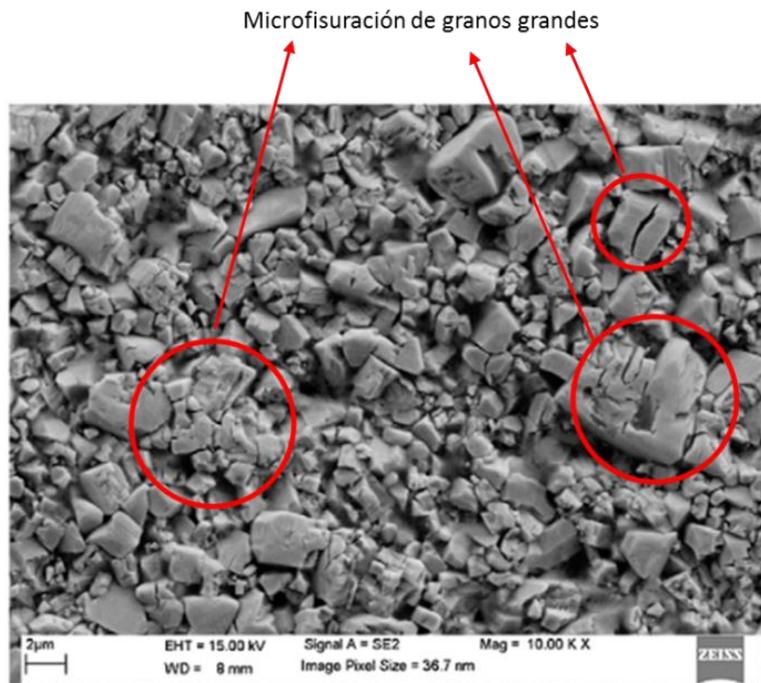


Figura 1-0-14. Recubrimiento base WC NK07; Ángulo de incidencia de 45° [31]. Se aprecian grandes desprendimientos de material dentro de la estructura del material

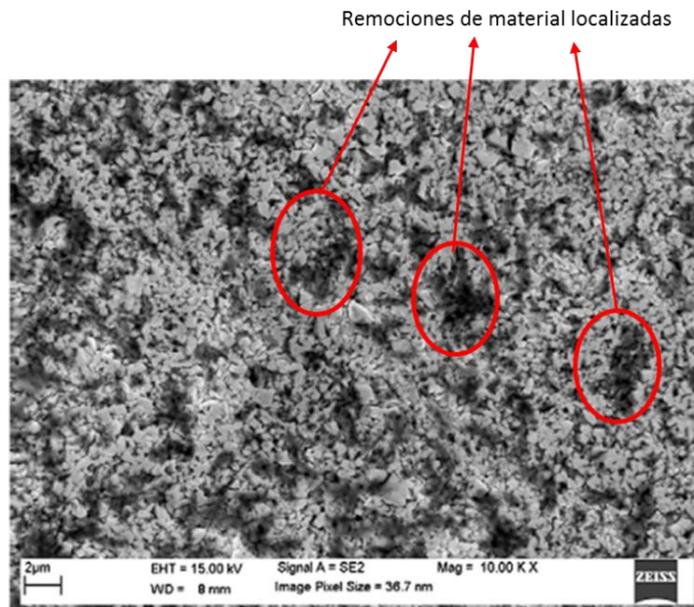
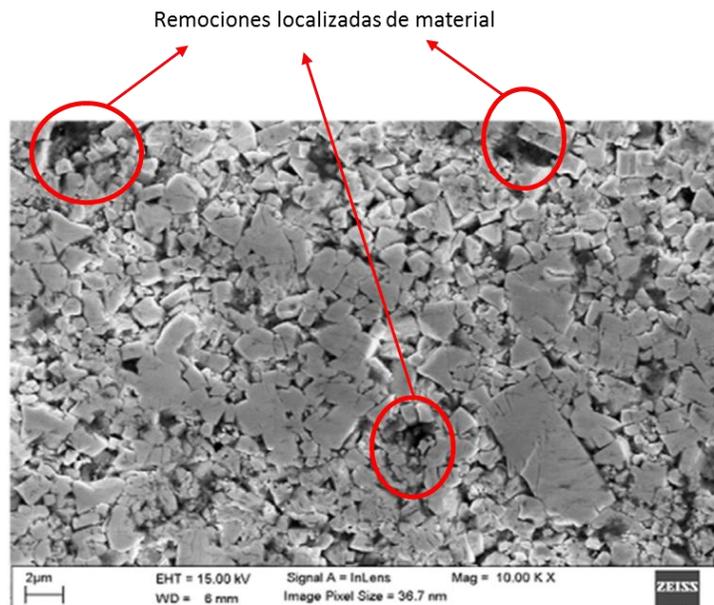
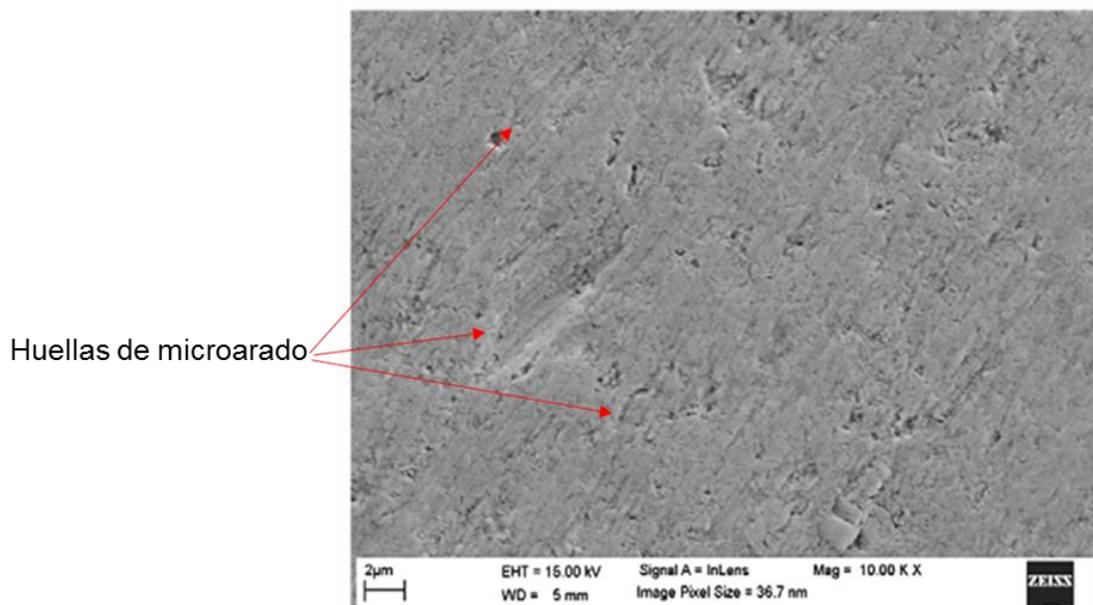


Figura 1-0-15. Recubrimiento base WC mars11A; Ángulo de incidencia de 90° partículas erosivas de alúmina [31]. Se observan considerables desprendimientos de material en diferentes zonas.



Cuando existen materiales abrasivos que tienen ciertos contenidos de alúmina, se produce un arado con consecuente deformación plástica, aun sobre materiales con grano fino y duro
Figura 1-16.

Figura 1-0-16. Recubrimiento base WC NQ07; Ángulo de incidencia 45° partículas erosivas alúmina [31]. Marcas de arado sobre la superficie de trabajo



Una premisa de impacto cuasi estático y dinámico en materiales frágiles es que la fractura tiene parte fundamental en la remoción de material. La longitud de las fisuras en metales duros puede ser mayor en orden de magnitud que las microfisuras vistas durante los procesos de la erosión. [31]

Es de suma importancia considerar que múltiples ensayos muestran contraste en el progreso del desgaste, dependiendo de la distancia que el material abrasivo ha cubierto sobre su curso a través de la superficie. Se puede concluir que en la medida que hay mayor o menor flujo que tiene contacto sobre la superficie erosionada, por obvias razones implica un contacto abrasivo mucho mayor ó menor respectivamente y por consiguiente mayor ó menor tasa de desgaste. [33]

El mecanismo de desgaste erosivo sobre precipitados duros es una formación de fisuras laterales en forma de platillo que se generan por descarga después del impacto. El patrón

de las fisuras causadas durante la erosión de material frágil se asemeja a lo que se ve en indentación cuasiestática mediante un indentador de diamante. Para el caso de los abrasivos suaves, un período de incubación es necesario, durante el cual el daño sobre los recubrimientos duros es acumulado y su estado se mantiene hasta que las fracturas se forman. [29]

Los grandes recubrimientos son susceptibles a múltiples fracturas en la medida en que pueden contener mayor cantidad de defectos y dado a que la sílica triturada es un reconocido abrasivo para causar erosión, por su gran distribución de tamaños normalmente penetran los espacios intercaburos, removiendo la matriz, lo cual finalmente causa la remoción del carburo. [29]

Se ha podido determinar que durante los procesos de erosión se generan algunas socavaciones en la superficie, los cuales en algunas ocasiones son llenados con partículas del mismo abrasivo, lo cual causa obviamente ganancia de masa y protege de impactos fuertes a través de nuevos granos abrasivos.

Adicionalmente, en algunos casos puede evidenciarse micro corte, en la medida que el ángulo de incidencia del abrasivo sea mayor que un ángulo crítico determinado. En otros casos, intenso desgaste en los bordes de la matriz hacen que los carburos sobresalgan superficialmente y sean vulnerables a la fractura también. [29]

Las Figuras 1-17 y 1-18 nos permiten ver algunas variaciones en el mismo mecanismo de desgaste. Para el caso de superficie impactada con alúmina, se aprecia una erosión selectiva con fractura frágil del material de recubrimiento y también deformación plástica. Por otro lado, cuando la superficie es impactada con sílica, la estructura observada es más fina que en la figura anteriormente descrita, y se aprecian algunos cráteres sobre la superficie. [29]

Figura 1-0-17. Recubrimiento Alloy 56 C 0,6% Cr16% erosionado con alúmina. [29]

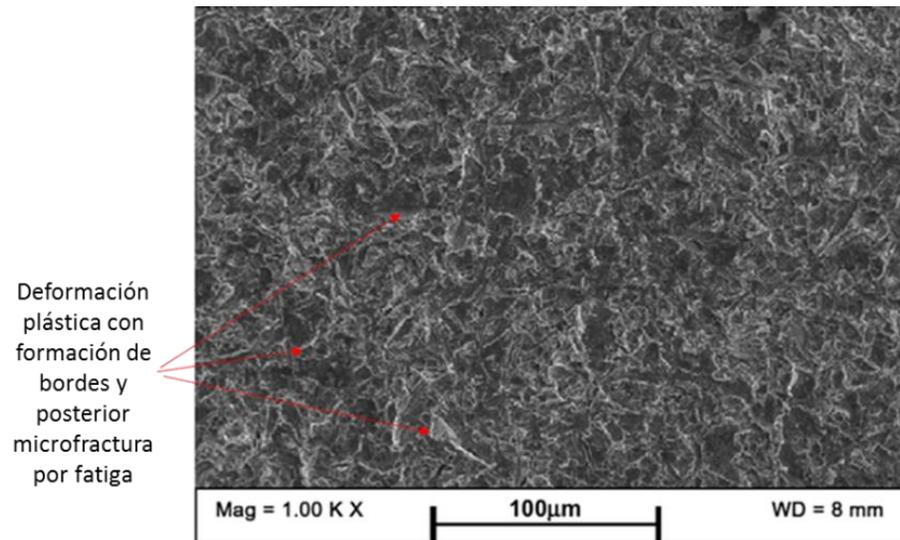
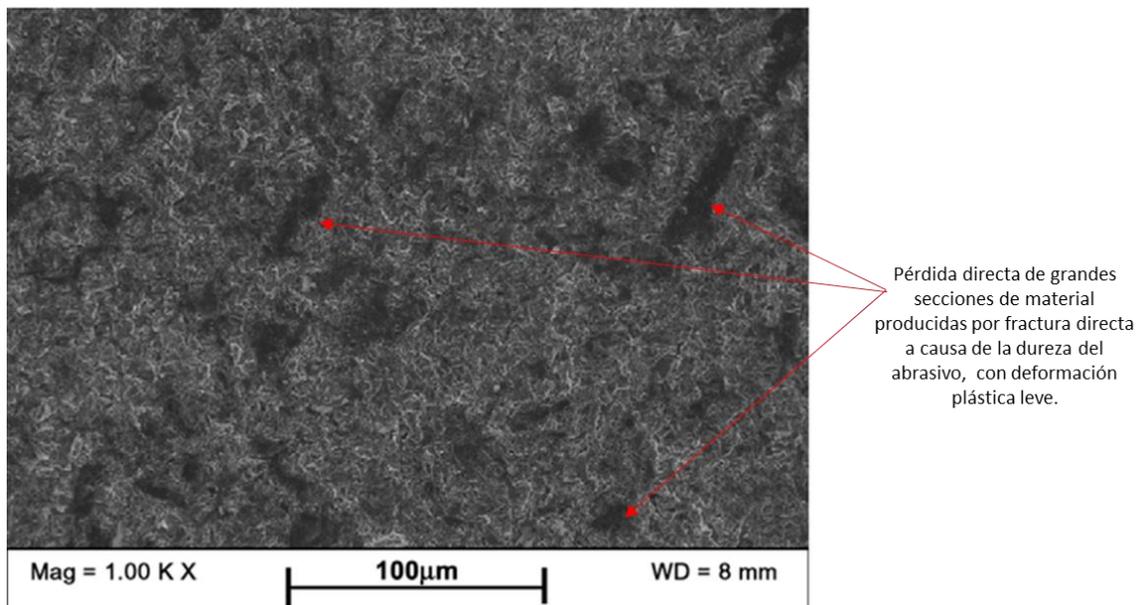


Figura 1-0-18. Recubrimiento Alloy 56 C 0,6% Cr 16% erosionado con sílica. [29]



Para el caso de materiales con recubrimientos duros, basados en carburos de Tungsteno, de Cromo, de Niobio, de Boro, el crecimiento de deformación plástica en los granos

individuales de los carburos alcanza tal punto que la fractura empieza a ocurrir, acompañada por debilitamiento y fragmentación de granos individuales. Se evidencia considerable deformación plástica en materiales con grano más grande y es debido a una línea de deslizamiento entre dichos granos.

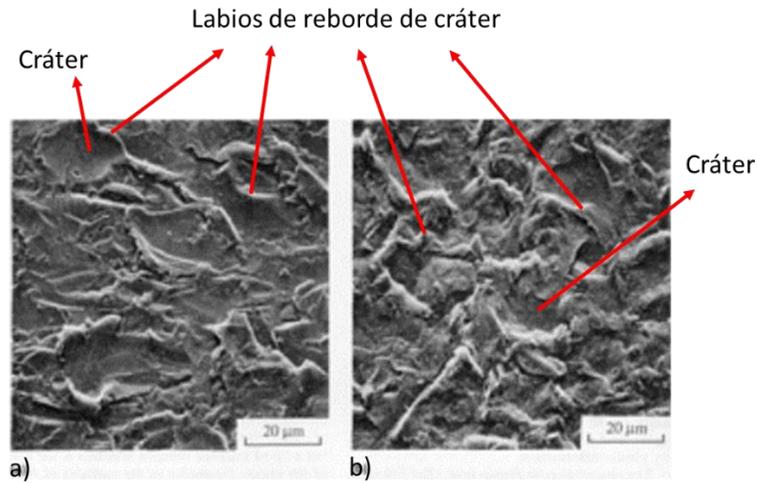
Para el caso de materiales de grano fino, normalmente no se aprecian señales de esas líneas de deslizamiento y por tanto el principal mecanismo de desgaste consiste en fractura y remoción de granos sin evidencia de mayor deformación plástica [20].

Haciendo un resumen para los materiales recubiertos, el proceso de desgaste que se produce cumple un ciclo, en el cual la capa aglomerante superficial es removida casi instantáneamente permitiendo la aparición de considerable deformación plástica en los granos de los carburos. Cuando hay gran deformación plástica y no puede ser acomodada adecuadamente o cuando las fuerzas de impacto son muy grandes, granos individuales se fracturan y fragmentan. Posterior a ello se empieza a generar un crecimiento de grietas entre granos individuales de carburos en la estructura del material. Finalmente hay desmoronamiento de granos simples de los carburos [20]

1.10.1.2 Mecanismo de falla Dúctil

Por su parte, cuando los materiales son un poco más dúctiles, se evidencia un mecanismo diferente y está asociado con la formación de labios que rebordean el cráter del impacto y son claramente visibles alrededor del mismo como se aprecia en la figura 1-19, siendo este proceso más notorio con ángulos de incidencia bajos, del orden de los 20°, y tal como lo mencionó Hutchings [72], Finnie et al [73] y muchos otros autores, dichos labios son probablemente vulnerables a una eliminación directa posterior ó a ser empujados hacia la superficie y convertirse en laminillas que eventualmente pueden ser eliminadas por fractura dúctil ó por fatiga posterior a impactos sucesivos [73]

Figura 1-0-19. Superficie típica de Níquel comercial erosionada con partículas de Al_2O_3 de $130\mu m$ y a dos ángulos de incidencia. a) 20° . b) 90° . La velocidad del erosivo fue $53,8m/s$. [74]

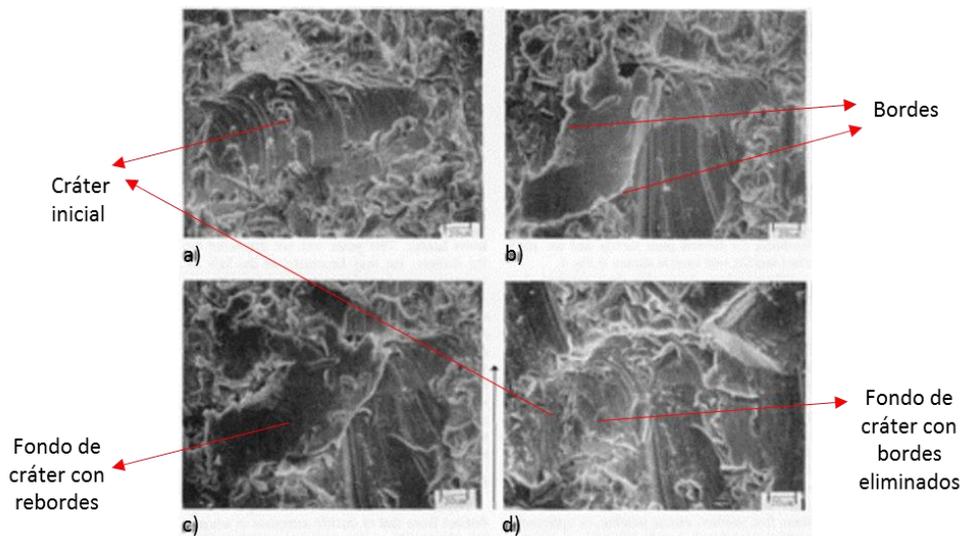


Para el caso de ángulos de incidencia normales, se evidencia mayor daño superficial porque el impacto provoca mayor cantidad de cráteres y el desplazamiento volumétrico hacia los rebordes es mayor aun cuando sin desprendimiento. El mismo Finnie posteriormente [75] y Mayville [76] encontraron que este mecanismo actúa aplanando las protusiones y eliminándolas posteriormente a partir de impactos sucesivos. El volumen eliminado típicamente es más pequeño que el cráter en aproximadamente un 200%, enfatizando que se requiere impacto múltiple para la subsecuente eliminación de material. El mismo Finnie et al, describió este mecanismo de eliminación de material como un “golpeteo” continuo de la superficie, que conduce a la eliminación cuando la extrusión de material vulnerable conduce a una fractura dúctil [75].

De otro lado, Bellman y Levy [77] observaron que la eliminación de material durante la erosión implica la deformación del material en laminillas delgadas que van siendo removidas también por impactos repetidos, sucede el desprendimiento posterior y el proceso vuelve a darse, tal como se puede ver en la figura 1-20, en la que se observa un cráter inicial a partir del impacto de una partícula en la imagen a), que posteriormente es impactado por otras partículas deformándose hacia la zona izquierda b) y c) y dando paso a la eliminación de los bordes laminares como se aprecia en la imagen d).

Figura 1-0-20. Micrografías mostrando erosión secuencial de Aluminio 7075-T6.

SiC a un ángulo de incidencia de 30°, con velocidad de 30.5m/s. [77]



Por su parte, Bitter [78], [79] ofreció un modelo en el cual pudo establecer que había una separación entre la erosión por corte y la erosión por deformación, con el primer mecanismo alcanzando un máximo a un ángulo de incidencia de 20° y por su parte el mecanismo dúctil alcanzando un máximo a 90°. Después de todo entonces, podría decirse que el mecanismo de formación de laminillas puede ser el mecanismo predominante de pérdida de material con ángulos de incidencia cercanos a los 90° y de la misma manera podría decirse que el micromecanizado sería el mecanismo predominante con ángulos de incidencia bajos.

1.10.2. Mecanismo de falla durante la erosión en elastómeros

En el caso del desgaste en elastómeros, una muy pequeña cantidad de energía cinética será absorbida durante el impacto. Depende mucho de la resiliencia del elastómero. Cuando se tiene un ángulo de incidencia normal, el coeficiente de Poisson es aproximadamente 0,5, los esfuerzos de tensión en la superficie debido al impacto será predominantemente de naturaleza friccional.

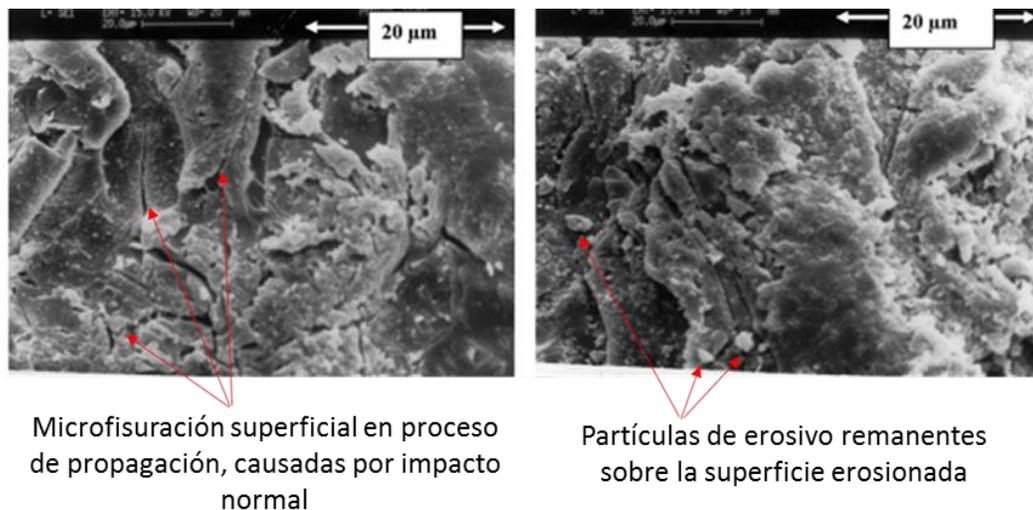
Los esfuerzos de tensión que surgen de las fuerzas friccionales debidas al impacto de la partícula causan finas fisuras que crecen progresivamente en la superficie. La pérdida de material ocurre cuando las fisuras se unen.

Otro proceso que se presenta en los elastómeros implica una acumulación constante de tensión sobre la superficie debida a una incompleta relajación de esfuerzos entre impactos. Se supone que la tensión producida para un solo impacto es insuficiente para causar remoción de material, de manera que se puede observar gran resistencia a la erosión en elastómeros con una resiliencia mayor. [8]

Ángulos de incidencia oblicuos, muestran la formación de lágrimas y fisuras perpendiculares a la dirección de la erosión. Una serie de crestas se forman transversalmente a la dirección del impacto, durante las primeras etapas del fenómeno de erosión. Las partículas que impactan se deslizan sobre la superficie y deforman las crestas, provocando el crecimiento de grietas por fatiga desde la base de cada cresta. Se puede asumir entonces que el crecimiento de esas fisuras por fatiga es lo que determina la velocidad del proceso de erosión fomentado por esfuerzos de tensión. [8]

Micrografías tomadas a superficies de polímeros expuestas a ángulos de incidencia de 90° y alta velocidad de impacto, pueden apreciarse en la Figura 1-21.

Figura 1-0-21. Micrografías superficies de polímeros ángulo de incidencia 90°. [12]

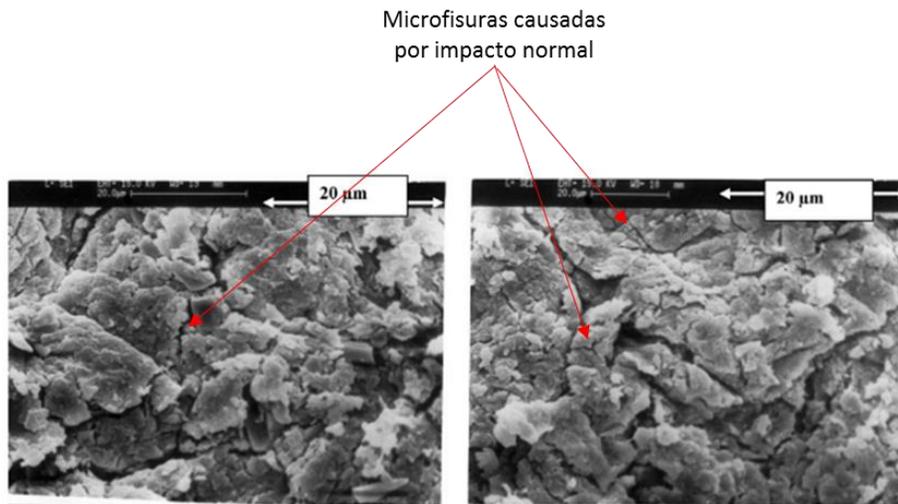


Se aprecia claramente un corrugamiento de la superficie circundante a la huella de desgaste; adicionalmente se aprecian microfisuras como mecanismo de desgaste predominante. Aunque este es un polímero dúctil, el mecanismo de falla no parece ser dúctil sino antes bien

demasiado frágil. Pueden apreciarse además partículas de abrasivo embebidas en la superficie.

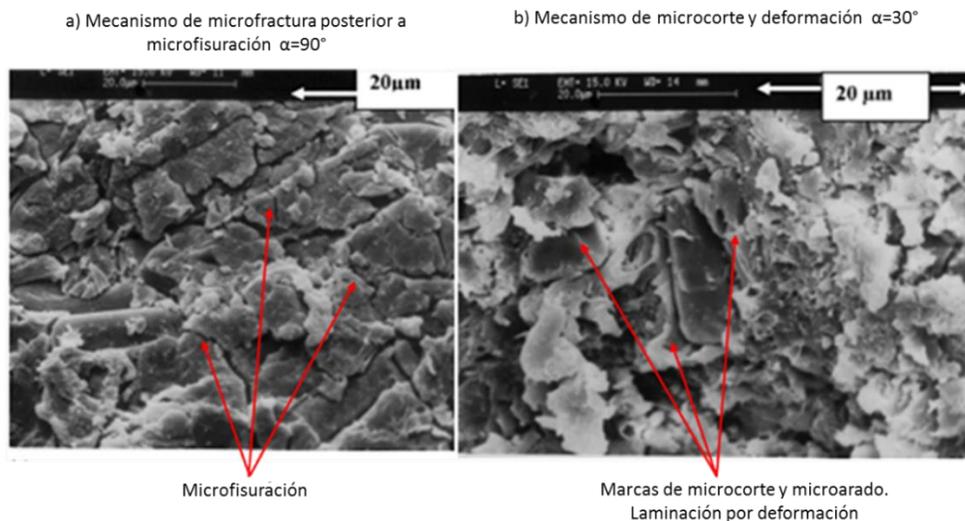
En la Figura 1-22 se puede apreciar que debido a ese impacto normal, se genera toda una red de microfisuras en la superficie expuesta, esto obviamente debido a que toda la energía del impacto es disipada por el impacto y la microfisura.

Figura 1-0-22. Micrografías superficies de polímeros ángulo de incidencia 90° [12]



Al mantener la velocidad y disminuir considerablemente el ángulo de incidencia, el mecanismo cambia tal como se puede apreciar de manera comparativa en la Figura 1-23.

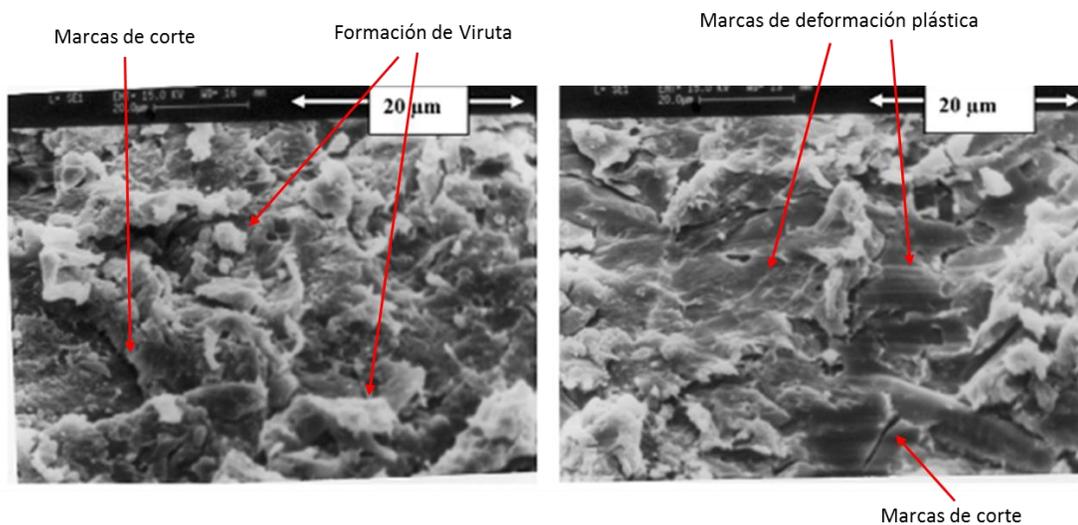
Figura 1-0-23. Micrografías superficie polímero ángulo de incidencia a)90° b)30° [12]



En este caso, se observan las superficies desgastadas y se puede apreciar que cuando se impacta a un ángulo bajo, partículas erosivas duras se verán sobre la superficie de impacto, lo cual refleja alguna apariencia de marcas de abrasión típicas y cuando el proceso de erosión es continuo, habrá remoción de material por micro cutting y/o microarado.

La Figura 1-24 muestra la superficie desgastada de polímeros sometidos a velocidades medias y ángulos de incidencia medios.

Figura 1-0-24. Micrografías polímeros sometidos a velocidad y ángulo medio [12]



Por causa del repetido impacto de las partículas de erosivo se generan rugosidades sobre la superficie debido a una gran deformación plástica. Tal como se puede apreciar, al tomar micrografías cerca del cráter de la erosión, marcas de abrasión típica pueden ser vistas más claramente ya que se aprecian rasgos de gran deformación plástica con consecuente formación de viruta. [12]

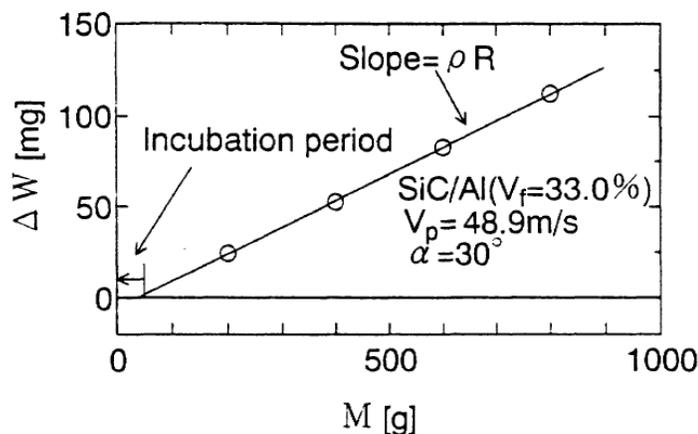
1.11 Ensayos de Caracterización Mecánica

Son ensayos estandarizados bien por procedimiento ó por utilización de aparatos calibrados y adecuadamente certificados que se usan para medir los valores de las propiedades mecánicas de los materiales acorde con sus características de respuesta, bien sea a través de valores absolutos, que permiten dimensionamiento, ó por valores relativos que definen niveles de aceptación.

1.11.1. Peso

La variable respuesta comúnmente relacionada con el desgaste es el peso del material. El peso perdido (g) se mide en una balanza de precisión. A partir del cálculo y análisis de pérdidas de peso progresivos, se pueden elaborar curvas de erosión típicas para los diferentes materiales, en las cuales al final se identifican varias fases típicas de evolución de desgaste. En la Figura 1-25 se puede apreciar una curva típica para SiC/Al con un ángulo de incidencia de 30° y una velocidad de partícula de 48,9 m/s. Este tipo de curvas son compuestas como se mencionó anteriormente por un período de incubación, durante el cual no hay pérdida de peso, seguido de un período de pérdida de peso estable, en donde éste fenómeno es proporcional a la cantidad de masa de partículas impactadas M (kg).

Figura 1-0-25. Curva de erosión para SiC/Al [38]



1.11.2. Estereoscopia

La estereoscopia es un proceso mecánico artificial capaz de imitar el proceso de visión binocular del ser humano en un campo visual, para recolectar información tridimensional de un objeto y a su vez transmitirla de manera que pueda ser observable de la misma manera; similar a un proceso que pudiera realizarse de manera natural, cuando un observador mira simultáneamente dos imágenes de un mismo objeto, que han sido captadas desde dos posiciones distintas. La estereoscopia logra tener la convergencia relativa de los ejes ópticos, cuando se miran los objetos a distancias variables, lo cual permite la apreciación de la profundidad a la que se observan dichos objetos. [39,40]

1.11.3. Microscopia electrónica de barrido SEM

La microscopía electrónica de barrido, es una técnica de análisis de superficies, la cual se realiza mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM), el cual proporciona a través de la aplicación de un fino haz de electrones acelerado y focalizado que recorre una superficie de análisis, información físico-química e imágenes morfológicas de dicha superficie, al transformar dichos electrones procedentes de un filamento, en corrientes eléctricas que convenientemente recolectadas y amplificadas se emplean para formar una imagen.

La interacción electrón (haz) – átomo (material), genera una dispersión elástica debida al intenso campo coulombiano del núcleo que produce una desviación angular de la trayectoria del electrón incidente. Se ha demostrado que la dispersión será mayor, en la medida en que la muestra analizada esté constituida por elementos con mayor número atómico, por consiguiente más pesados.

Los electrones que a lo largo de su trayectoria son dispersados con un ángulo mayor de 90° , se denominan retrodispersados, o de contraste composicional. Así, la información adicional suministrada por este tipo de electrones dará lugar a zonas oscuras o brillantes, dependiendo si la composición de la zona corresponde a elementos más ligeros o de número atómico menor que aquellas zonas en las que por el contrario existen elementos más pesados respectivamente. Los electrones retrodispersados permiten obtener también información cristalográfica del material de acuerdo con la ley de Bragg.

Por otro lado, se produce también una dispersión de tipo inelástico, debido a la interacción de los electrones del haz incidente y los electrones de un determinado orbital, proceso en el cual se emiten electrones de tipo secundario.[41,42]

A partir de lo anterior, se hace necesario tener en cuenta ciertos parámetros, de manera que se pueda extraer en consecuencia la mayor información posible y asimismo interpretar adecuadamente las imágenes que se obtienen. Entre los principales están:

1.11.3.1. Resolución

Esta depende del voltaje de aceleración aun cuando también está relacionada con el diámetro del haz, que por su parte es dependiente de la intensidad de corriente. Con normalidad, para incrementar la resolución de una imagen es necesario disminuir al máximo la corriente, y en otras ocasiones incrementando el brillo, lo cual depende del material del filamento que normalmente es hexaboruro de lantano y, que para los SEM de alta resolución son filamentos de emisión de campo. [41, 42]

1.11.3.2. Profundidad de campo

Se define como la diferencia de altura que hay entre dos planos de la muestra y que presentan la misma calidad de foco. La profundidad que alcanzan los electrones incidentes dentro de la muestra, disminuye en la medida que se incrementa el número atómico de ésta. La profundidad del campo varía con la distancia de trabajo, la cual es la distancia que hay entre la muestra y la pieza polar de la lente objetivo. Debido a que los electrones incidentes sobre la superficie, sufren a lo largo de su trayectoria choques subsecuentes de tipo tanto elástico como inelástico, se origina desaceleración y dispersión que a su vez generan una serie de señales que son la fuente de información sobre la muestra, al ser llevadas al exterior, teniendo en cuenta que la resolución de dicha información depende del volumen de material excitado por el haz.

1.11.3.3. Volumen de emisión y la penetración máxima

Respecto al volumen desde donde son emitidas las señales, se puede establecer de modo aproximado que son 500 Å para electrones secundarios, entre 500 Å y 1 µm para electrones retrodispersados y 1 µm – 5 µm para rayos X.

La penetración máxima, se define como la máxima distancia, desde la superficie de la muestra, que puede recorrer un electrón incidente, la cual depende de la energía del electrón y del número atómico medio de la muestra. [41, 42]

Se usan microscopios de barrido electrónico con bajos aumentos e iluminación normal para detallar características microestructurales sobre las superficies de desgaste y con alta iluminación para determinar la topografía de la superficie de desgaste.

Mediante SEM se determina a través de las secciones transversales la incidencia de la microestructura de los metales en el proceso de pérdida de material, mientras que mediante confocal (imágenes 3-D) se evidencia la deformación plástica en procesos en los cuales este mecanismo de desgaste es predominante [31]

1.11.4. Metalografía

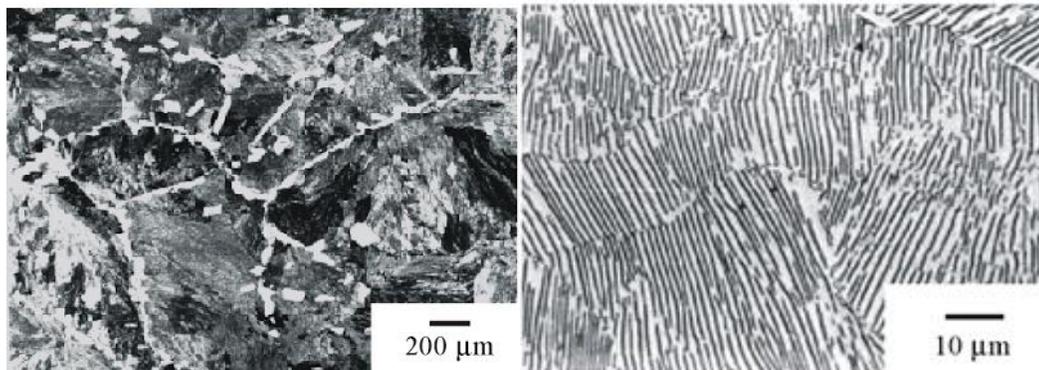
La metalografía es la ciencia que estudia las características microestructurales de los metales ó de sus aleaciones, en relación con sus diferentes propiedades químicas, mecánicas y/o físicas. Para ello es necesario tomar muestras que representen suficientemente el material a ser analizado, y que dichas muestras sean adecuadamente preparadas siguiendo un protocolo previamente determinado, contenido en la norma ASTM E3-01, en el cual se incluye el corte a un tamaño adecuado sin que durante este proceso sufra sobrecalentamiento para no dañar la microestructura, posteriormente se introduce dentro de una resina, para posteriormente pulir la superficie a examinar hasta que esté totalmente libre de ralladuras, hasta nivel espejo. El siguiente paso es realizar un ataque químico a la superficie para revelar la microestructura, la cual se realiza mediante la inmersión o fregado superficial con diversos productos dependiendo el material a ser analizado (el nital es uno de los más usados para atacar aceros). Finalmente se lleva al microscopio metalográfico Figura 1-26, el cual permite examinar la muestra con aumentos que oscilan entre los 50X y los 2000X.

Figura 1-0-26. Microscopio metalográfico [43]



Este microscopio posibilita la observación de la distribución y el tamaño de los granos o cristales que constituyen el material, las diferentes fases presentes, los bordes de grano entre otras características como se observa en la Figura 1-27. Adicionalmente dispone de un sistema de iluminación que hace incidir un haz de luz sobre la superficie de estudio y recoge el haz reflejado. [43,44]

Figura 1-0-27. Imagen para la Perlita y Ferrita 90%-10% [43]



1.11.5. Dureza

La dureza es una propiedad de los materiales sólidos. Dicha propiedad define la resistencia que oponen dichos materiales a ser deformados ó rayados de manera permanente.

A través de dicha propiedad, los materiales metálicos permiten estimar propiedades como la resistencia, la capacidad de desprender virutas, la conformabilidad, o la resistencia al desgaste, incluso mediante la norma DIN 50150, los valores de la dureza pueden convertirse en valores de resistencia máxima a la tracción.

La relación es: Resistencia Ultima a Tracción = 3,5 HB (HB, dureza Brinell)

Para medir el valor de la dureza de un material se utilizan diferentes métodos, entre los cuales se incluye una primera aproximación para determinar la dureza de un material es el denominado “Ensayo de Mohs”, que se basa en la capacidad de una material de rayar a otro. La dureza basada en este método se mide en una escala que incluye los niveles del 1 hasta el 10, siendo el 1 la medida del talco y el 10 la medida del diamante. Así las cosas, un

material con número de dureza mayor en la escala, tendrá la capacidad de rayar a uno más bajo.

Por otro lado, para obtener el valor de dureza de los materiales como los hules, los plásticos y en general materiales no metálicos, se usa un aparato de medición denominado durómetro, el cual tiene un indentador en su extremo, el cual al ser presionado sobre la superficie del material, penetra al material, de lo cual depende la medida de la dureza. Para materiales blandos se usa una escala denominada "A", y para materiales más duros se utiliza la escala "B".

La gran mayoría de los otros métodos relacionan la dureza con la deformación por la penetración de un indentador, el cual al ser presionado por una carga definida sobre la superficie del material deja una huella a determinada profundidad. Los diferentes métodos, dependen del material y la forma del indentador.

Los métodos más utilizados son el Brinell, el Rockwell y el Vickers, y sus características y equivalencias se pueden apreciar en el Anexo E.

1.11.5.1. Ensayo Brinell

Este ensayo fue desarrollado en 1900, por J.A. Brinell. En el mismo, se ejerce la compresión de una esfera de acero o de carburo de tungsteno con diámetro de 10 mm, contra la superficie del material a evaluar, con una carga (p) de 500 kg, 1500 kg ó 3000 kg. La dureza Brinell HB, es la relación de la carga (p) al área de la superficie curvada de la indentación. Se usan esferas de carburo de tungsteno debido a que tienen un elevado módulo de elasticidad, se distorsionan menos que las bolas de acero y se recomiendan por lo general para números de dureza Brinell superiores a 500.

1.11.5.2. Ensayo Rockwell

Es un ensayo que fue desarrollado en 1922 por S.P. Rockwell. Mide la profundidad de penetración en lugar del diámetro de la indentación. En este tipo de ensayo, el indentador de acero o de diamante se oprime perpendicularmente sobre la superficie que debe ser lisa, ejerciendo una carga menor y posteriormente una carga mayor, teniendo entonces dos

profundidades diferentes siendo esta diferencia la que permite establecer la dureza del material.

Existen diferentes procedimientos de aplicación de este ensayo, depende del espesor de la pieza de ensayo o de la dureza de la capa superficial, la cual se especifica en la norma DIN EN 10109. Al valor numérico debe añadirse la abreviatura del procedimiento de medición.

1.11.5.3. Ensayo Vickers.

Es un ensayo desarrollado en el año de 1922, que utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide y una carga que oscila entre 1 kilo y los 20 kilos. Las impresiones que se obtienen son inferiores a 0,5 mm y los valores de dureza no cambian independientemente de la carga. Se usa para ensayar gran cantidad de materiales incluyendo los aceros tratados térmicamente [46, 47].

1.12 Caracterización Química

1.12.1. Espectroscopia

1.12.1.1. De Emisión Óptica

La espectrometría de emisión óptica (llamada de esta manera debido a la naturaleza de la luz que se emite) permite determinar la cantidad y el tipo de elementos químicos presentes en una muestra de material, mediante la detección de las longitudes de onda características de cada elemento, las cuales son emitidas durante su transición desde un estado excitado a un estado inferior de energía y que son características en función de su estructura electrónica. La excitación puede lograrse mediante la generación de una chispa o arco que se produce en un pequeño espacio entre un par de electrodos, en donde el paso de electricidad entre los electrodos proporciona la energía para atomizar la muestra y producir iones en estado excitado, para así como resultado obtener unos espectros que permiten la determinación cualitativa y cuantitativa de elementos metálicos en las diferentes muestras analizadas. En la Figura 1-28 se puede observar un espectrómetro de emisión óptica.

Figura 1-28. Espectrómetro de emisión óptica [48]

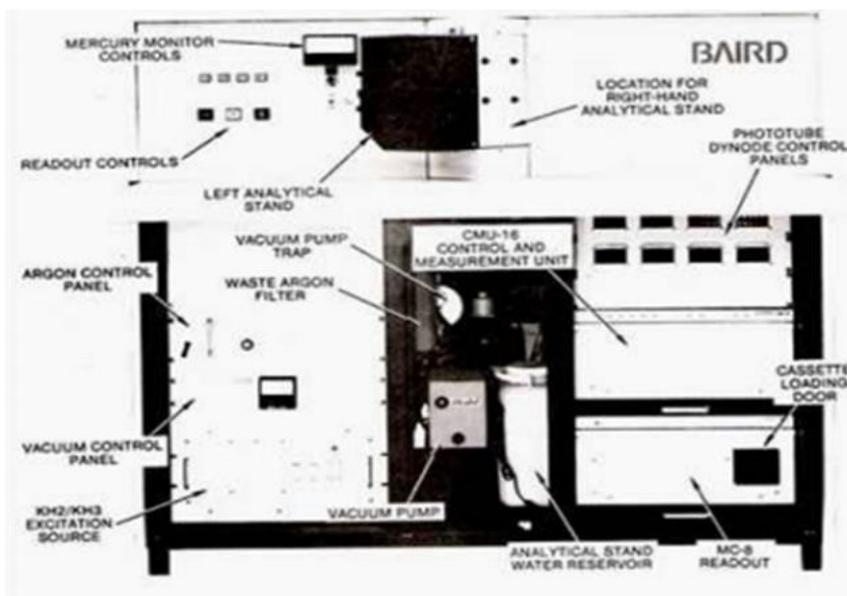


Figura 1-28 Espectrómetro 1

1.12.1.2. Infrarroja

Este tipo de espectroscopía utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético, fundamentada en que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que son correspondientes con los niveles de energía propios de cada molécula. Dichas frecuencias vibracionales dependen de la forma de la superficie, de la energía potencial de la molécula, de la geometría y de las masas atómicas de los elementos que la constituyen.

Cada tipo de enlace absorbe radiación infrarroja a una frecuencia distinta, lo que permite determinar qué tipo de grupos funcionales posee la molécula en estudio.

Tradicionalmente, en el eje x de los espectros de infrarrojo se emplea el número de ondas ($\bar{\nu}$) y se define como el inverso de la longitud de onda en cm. $\bar{\nu} = 1/\lambda$. En el eje y se representa el porcentaje de radiación transmitida (transmitancia) que se representa por %T. En un espectro de infrarrojos se representa la frecuencia (en número de onda) frente al porcentaje de luz transmitida (transmitancia). El porcentaje de transmitancia se define como el cociente

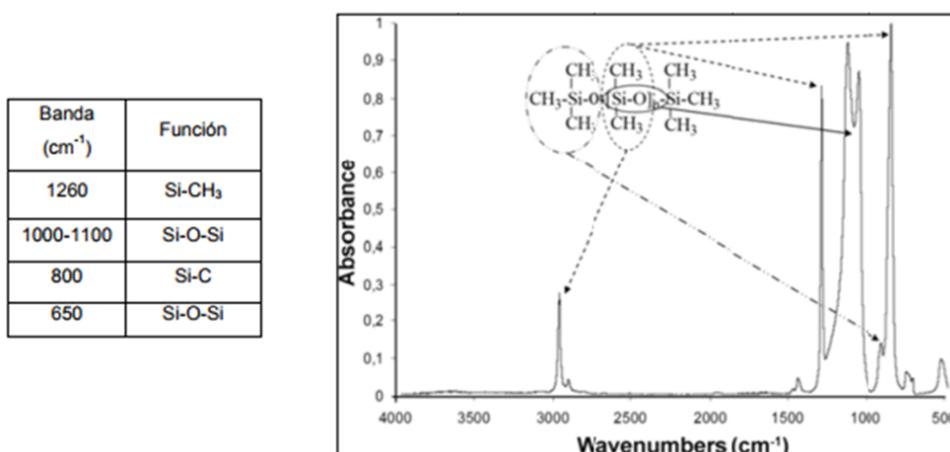
entre la intensidad de la luz transmitida a través de la muestra, IM, y la intensidad de la luz del haz de referencia IR multiplicado por 100 Ecuación (1.8).

$$\% \text{Transmitancia} = \text{IM} / \text{IR} \times 100 \quad (1.8)$$

Las bandas representan zonas donde los enlaces de la molécula absorben radiación infrarroja. En las bandas la transmitancia es pequeña y la absorbancia grande.

Debido a que las siliconas tienen baja reactividad, es necesario acudir a la espectrofotometría como técnica eficaz para el análisis cualitativo de los compuestos constitutivos, dado a que los espectros de los polisiloxanos son muy característicos y por consiguiente fáciles de identificar. Son conocidas las bandas más características tal como se aprecia en la Figura 1-29.

Figura 1-29. Análisis por espectrometría infrarroja para polisiloxanos [49]



Se aprecia claramente la banda del metilo en la región de los 1260 cm⁻¹; igualmente una amplia banda correspondiente al dimetilo y una pequeña al trimetilo. Entre los 1000 y los 1100 cm⁻¹ se observa una doble banda correspondiente a vibraciones de los enlaces Si-O-Si. [49]

2. Desarrollo experimental

2.1 Diseño del experimento

Dado que se desea conocer cuál de los tres materiales propuestos (lámina recubierta con soldadura rica en carburos de cromo reforzada con una controlada dispersión de carburos de Niobio y de Boro, lámina endurecida mediante tratamientos térmicos y lámina A-36 recubierta por una capa polimérica) ofrece el mejor desempeño en cuanto a pérdida de peso en las paredes de una cámara de un molino de cemento, se plantea realizar una experimentación bajo condiciones reales y determinar cuál de los materiales presenta la menor pérdida de peso después de ser sometidos a las condiciones de trabajo preestablecidas, pues este factor es fundamental a la hora de predecir el comportamiento de cualquier material a desgaste.

Al interior del molino y sobre la superficie en donde se quiere aplicar el recubrimiento fluye una corriente de aire con partículas abrasivas, y cuya dirección de flujo es variable dadas las condiciones de flujo turbulento a la salida del anillo de toberas a través del cual es inyectada la corriente de aire con cemento, de tal manera que el ángulo de “impacto” de las partículas sobre la superficie varía y no es posible tener control sobre el mismo.

El tiempo de exposición fue de 20 días, durante los cuales el molino operó de manera continua y con diferentes condiciones, las cuales fueron similares en cuanto a las cantidades de los materiales a ser molidos (porcentaje de Clinker, puzolana y yeso en la mezcla), características de las materias primas, temperaturas de proceso y humedad al interior de la cámara. Al final del experimento se evaluó la variación de peso sobre cada uno de los materiales en prueba y sobre ello se establecieron las conclusiones pertinentes.

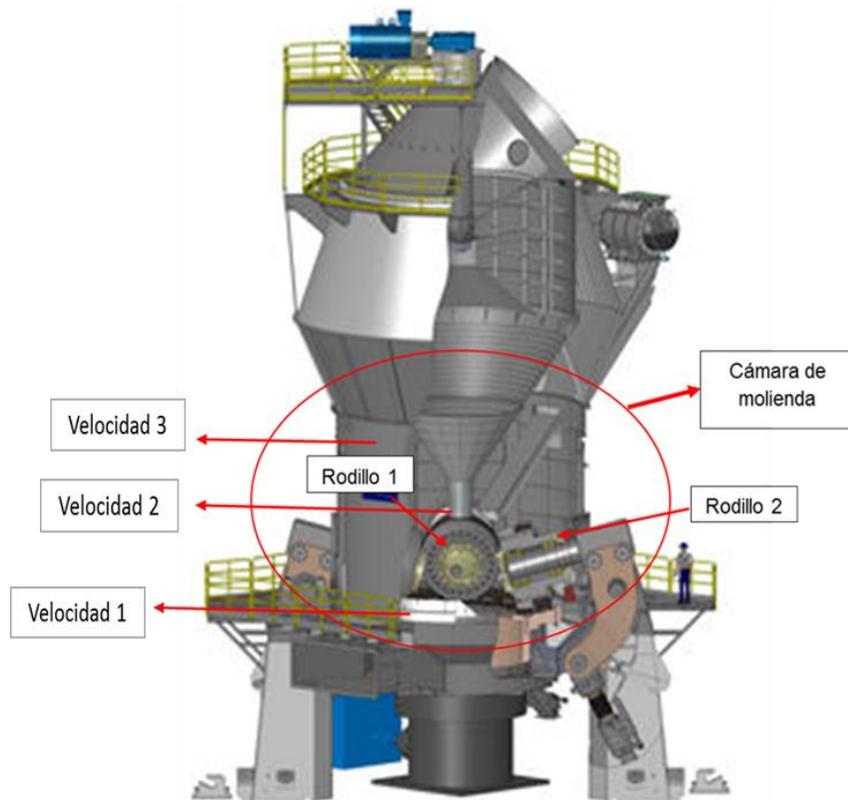
La cámara de molienda es cilíndrica y contiene 4 rodillos molturadores, ubicados a 90° cada uno, lo cual divide la cámara en 4 regiones simétricas, de manera que el experimento se montó en una de las 4 zonas y delimitada por los ejes de dos rodillos.

Se propone un diseño factorial con tres factores, en donde se usarán 3 materiales, que serán sometidos a 3 diferentes velocidades de flujo, y 3 posiciones dentro del perímetro del molino.

En figura 2-1 se puede apreciar la distribución esquemática del factor velocidad para el diseño experimental.

Para cada uno de los factores se ha determinado tener 3 niveles así:

Figura 2-1. Esquema de zonas de velocidad utilizadas en el experimento



1. Materiales :

Lámina Termotratada, Lámina Recubierta con Soldadura, Silicona RTV

2. Velocidades:

V1 = 4,7m/s; corresponde a la parte alta de la cámara de molienda

V2 = 14,4 m/s; corresponde a la parte más alta de los rodillos molturadores

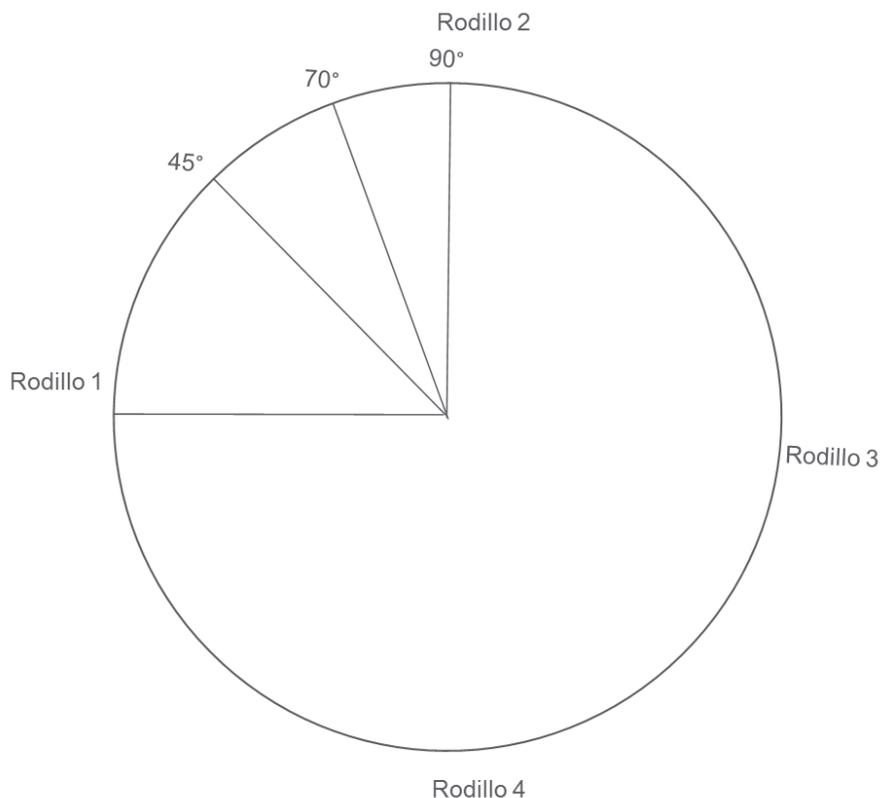
V3 = 47,5 m/s; corresponde a la salida del anillo de toberas

3. Posición:

45°, 70°, 90° medidos entre el centro del molino y el perímetro de la cámara, en el sentido de giro de las manecillas del reloj y tomando como valor 0° uno de los rodillos. La distribución

esquemática de la ubicación en la circunferencia se puede ver más claramente en la figura 2-2.

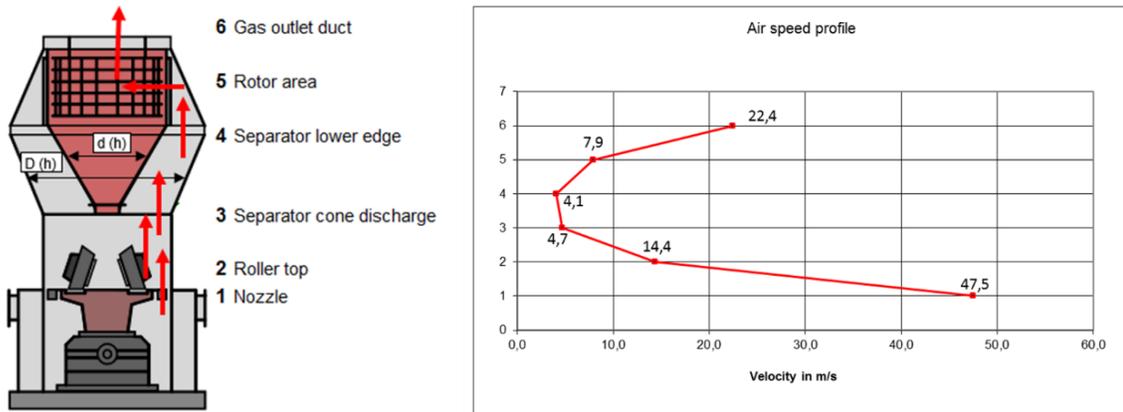
Figura 2-2. Distribución del experimento alrededor del cilindro de la cámara de molienda.



Las tres posiciones sobre el perímetro y entre los dos rodillos se determinaron a partir de inspección visual, de donde se dedujo que si bien el comportamiento entre cada par de rodillos es similar cada 90°, dicho comportamiento si es diferente dentro del marco de los 90° de circunferencia que está entre cada par de rodillos.

Por su parte, las velocidades fueron extractadas a partir del perfil de velocidades de la cámara de molienda del molino OK 36, la cual se puede apreciar en la figura 2-3, y cuya construcción se realizó a partir de las mediciones realizadas mediante tubos de Pitot en cada punto.

Figura 2-3. Perfil de velocidades del flujo de gases al interior del molino.



Un modelo lineal apropiado para el diseño sería Ecuación (2.1):

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2.1)$$

Para: $i = 1,2,3$; $j = 1,2,3$; $k = 1,2,3$ y $l = 1,2,\dots,n$

Dónde:

τ = Material

β = Velocidad

γ = Posición

y teniendo en cuenta que al ser un modelo de efectos fijos, entonces Ecuación (2.2):

$$\sum_{i=1}^3 \tau_i = \sum_{j=1}^3 \beta_j = \sum_{k=1}^3 \gamma_k = 0 \quad \text{y con un } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (2.2)$$

Al realizar inspección física al interior de la cámara de molienda, después de la prueba de desgaste, a simple vista se detecta que pueden existir diferencias significativas entre los diferentes tratamientos con respecto a la variable respuesta que nos interesa, en este caso la variación de peso.

Para establecer si realmente existen o no estas diferencias, debemos establecer las respectivas hipótesis de interés. En este caso, nos interesa saber si todos los factores y las

interacciones respectivas afectan la respuesta esperada, de modo que entonces podemos definir nuestras hipótesis como sigue:

- La hipótesis nula: no hay diferencia significativa entre la distribución del peso perdido entre materiales en todos los grupos. Por su parte la hipótesis alterna plantea que si hay diferencia significativa, con un nivel de confianza del 95%.
- La hipótesis nula: no hay diferencia significativa entre los pesos perdidos de cada material en todos los grupos. Por consiguiente la hipótesis alterna plantea que si hay diferencias significativas.
- La hipótesis nula: la distribución de los pesos perdidos por cada material a una velocidad determinada no tiene diferencias significativas; la hipótesis alterna será que si hay diferencia significativa entre la distribución de los pesos perdidos bajo las condiciones de velocidad definidas.
- La hipótesis nula: no hay diferencia significativa entre la distribución del peso perdido entre grupos a una misma velocidad mientras que la hipótesis alterna plantea que si hay diferencia significativa.

Para el cálculo del tamaño de muestra se tiene en consideración que teniendo en cuenta resultados obtenidos en el experimento previo, y en el cual se analizó la pérdida de peso, se definió $\delta = 3(\text{gr})$, valor que representa el promedio de pérdida de peso de los materiales estudiados, datos adjuntos en Tabla 2-1, así mismo analizando los datos se determinó que la desviación estándar σ es aproximada a 1,2. El valor $\alpha = 0,05$.

Tabla 2-1. Resultados experimento previo al proyecto actual

Material	Variable	Valor	Diferencia
Silicona F110	Peso inicial	308,5	3,2
	Peso Final	305,3	
Silicona RTV	Peso Inicial	289,7	1,5
	Peso Final	288,2	
Silicona 5699	Peso Inicial	276	3,8
	Peso Final	272,2	

Desviación Estándar = 1,193

A partir de lo anterior, se calcula el número de réplicas utilizando las Ecuación (2.3) y Ecuación (2.4).

$$d = \frac{|\delta|}{2\sigma} \quad (2.3) \quad \text{y} \quad n = \frac{n^* + 1}{2} \quad (2.4)$$

Reemplazando los valores respectivos en la Ecuación (2.3), se puede determinar el valor de n^* usando las curvas de operación características pertinentes y finalmente determinar el valor n que al final será el número requerido de réplicas de cada tratamiento especificado.

$$d = \frac{|3|}{2(1,2)} = 1,25$$

Con este valor (1,25) y a partir de la curva de operación correspondiente se obtiene un valor $n^* = 10$.

Al reemplazar el valor de n^* en la Ecuación (2.4), podemos determinar que el número de réplicas es:

$$n = \frac{n^* + 1}{2} = \frac{10 + 1}{2} = 5,5$$

El número de réplicas requerido es 5,5; para mejorar la confiabilidad de la respuesta se determinó realizar 7 réplicas para cada tratamiento.

2.2 Preparación de las muestras

En correspondencia con el número de tratamientos y réplicas, se prepararon 189 probetas en total a partir de los tres materiales, con dimensiones 3in x 1in x 3/8in, acorde con el estándar ASTM G65-04, el cual describe el método para la realización de la prueba de abrasión con arena, y que de alguna manera pudiera asemejarse en algunas condiciones al experimento expuesto en este documento (partículas abrasivas con alto contenido de Sílice), teniendo en cuenta que dicho experimento no es estándar en ninguna manera.

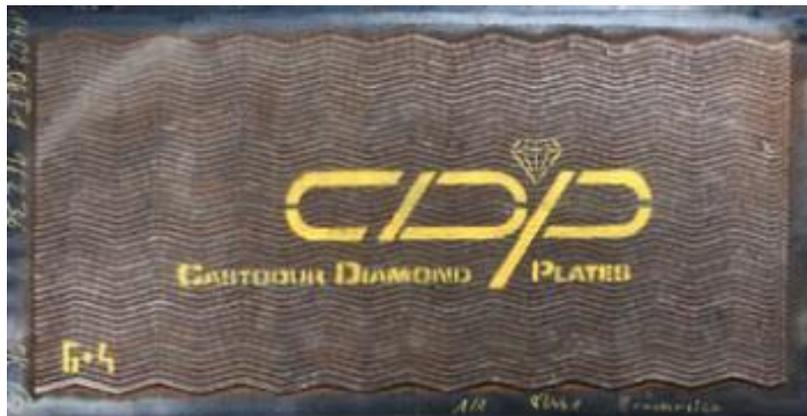
2.2.1. Equipos y materiales

- Lámina CDP 4666

Las unidades muestrales recubiertas por soldadura se elaboran a partir de una lámina recubierta por soldadura referencia “CDP 4666” de dimensiones 1220 mm x 2740 mm x 8 mm, fabricado por la compañía Eutectic Castolin y comercializada en Colombia por la compañía SAGER. La lámina CDP 4666 es la lámina recubierta por soldadura que tiene estandarizada Holcim Colombia como material de mayor especificación para Recubrimiento antidesgaste y que para los efectos de este trabajo, fue suministrada por Holcim para la preparación de las probetas de “mejor desempeño”.

El material base es hierro A-36, el cual es posteriormente recubierto por una aleación con más del 50% de Carburos de Cromo, Carburos de Niobio y Carburos de Boro, dureza superficial entre 62 HRC y 65 HRC y, temperatura máxima de operación de 550 °C. La apariencia de la lámina es la que se puede apreciar en la figura 2-4.

Figura 2-4. Lámina recubierta por soldadura referencia “CDP 4666”. [27]



- Lámina Termotratada.

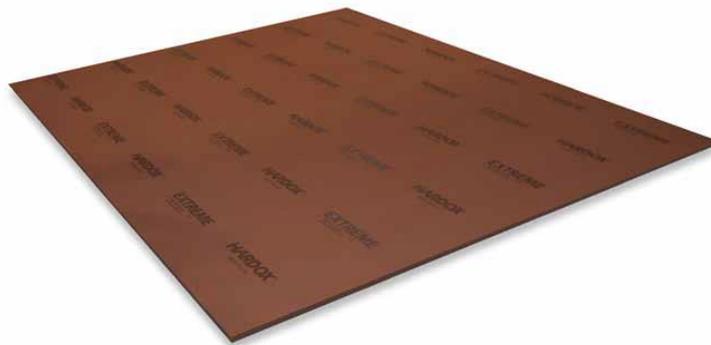
Las unidades muestrales termotratadas fueron fabricadas a partir de una lámina referencia “Hardox 400” de dimensiones 1650 mm x 3000 mm x 8 mm fabricada por la compañía Sueca “SSAB Swedish Steel AB”, suministrada por Holcim planta Nobsa. La composición química

del material está detallado en la Tabla 2-2 y la apariencia superficial se aprecia en la figura 2-5.

Tabla 2-2. Composición química nominal de lámina “Hardox 400” [50].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,32	0,7	1,6	0,025	0,01	1,4	1,5	0,6	0,004

Figura 2-5. Lámina “Hardox 400” [50].



- Equipo para corte de lámina con plasma.

El equipo utilizado para realizar los cortes de las láminas tanto recubiertas con soldadura como termotratadas fue un “VICTOR Thermal Dinamics cutmaster 102”, trifásico a 460V, tal como el que se puede observar en la figura 2-6.

Figura 2-6. Equipo “VICTOR Thermal Dinamics cutmaster 102”.



- Armadura para aplicación de silicona RVT

Para la aplicación de la silicona RTV se utilizó una pistola de presión convencional como la mostrada en la Figura 2-7. Esta pistola ejerce presión sobre el tubo y empuja el fluido para que sea depositado a través de la boquilla correspondiente.

Figura 2-7. Pistola para aplicación de silicona.



- Desengrasante Industrial

Para la limpieza del material base de las unidades muestrales recubiertas con silicona se utilizó un desengrasante industrial referencia “T5 Tough” fabricado por la compañía Norteamericana Monochem. Su presentación original es la que se observa en la figura 2-8.

Figura 2-8. Desengrasante industrial referencia “T5 Tough”.



- Molde para fabricación de probetas de silicona

Para la elaboración de las probetas de silicona se construyó, tal como se aprecia en la figura 2-9, un molde en balsa (dado que la aplicación la silicona se realizó a temperatura ambiente), con los compartimentos requeridos tanto en cantidad como en dimensiones.

Figura 2-9. Molde en balsa para fabricación de probetas.



- Resina para fijación

Para la fijación de las probetas a la pared de la cámara del molino se utilizó la resina epóxica de loctite “Durepoxi”, cuya presentación comercial se puede observar en la figura 2-10, producto de dos componentes, consistentes, compactos y homogéneos producidos a partir de polímeros sintéticos especialmente formulados para soldar en frío.

Figura 2-10. Resina epóxica de loctite “Durepoxi”.



- Balanza

Los pesajes de las probetas se realizaron en una balanza “SARTORIUS ED2245”, con precisión de diezmilésimas de gramo, con certificado de calibración 15850 emitido por el

laboratorio de metrología SIGMA. En la figura 2-11 se aprecia este equipo, el cual está ubicado en el laboratorio de control de calidad de Holcim Colombia, en su planta de Nobsa.

Figura 2-11. Balanza “SARTORIUS ED2245”.



- **Silicona RTV**

La fabricación de las unidades muestrales recubiertas con silicona, se realizó a partir de un producto referencia “LOCTITE SI 596 RD” producida por Henkel, Figura 2-12, cuya característica principal es mantener sus condiciones en temperaturas de hasta 315°C. La selección de este producto fue realizada por los antecedentes de este proyecto, ya que esta misma referencia fue utilizada como protección en la voluta de un ventilador, así mismo, fue sometida y comparada con otras dos referencias de siliconas comerciales en el experimento previo de chorro de arena y esta referencia fue la que presentó el mejor desempeño, pues sus características de trabajo permiten estar sometida a temperaturas superiores a los 300°C, condición que puede llegar a presentarse dentro de una cámara de molienda.

Figura 2-12. Silicona “LOCTITE SI 596 RD”.



2.3 Elaboración de las unidades muestrales

Las muestras provenientes de la lámina termotratada Figura 2-13 y la recubierta con soldadura se cortaron a partir de las láminas completas mediante el uso de un equipo de corte por plasma, teniendo en cuenta las dimensiones sugeridas en la norma ASTM G65, que es uno de los estándares internacionales comúnmente utilizados para medir severidad de desgaste y que fue usado también como guía para determinar el tamaño de las probetas del trabajo previo a esta investigación.

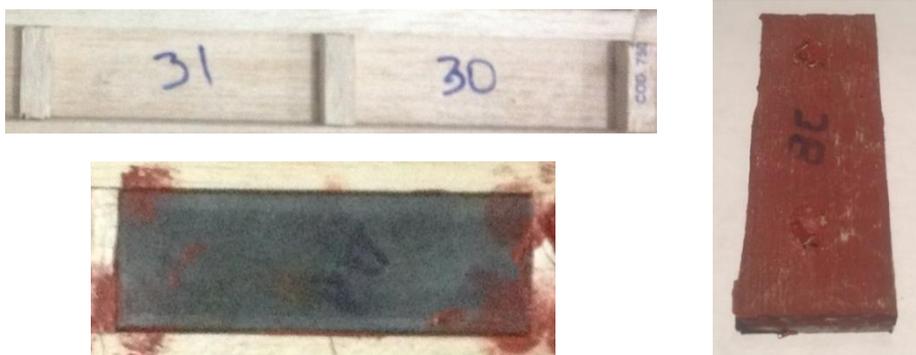
Figura 2-13. Muestras de lámina termotratada.



Las muestras recubiertas con silicona Figura 2-14, fueron obtenidas a partir de una base metálica y un recubrimiento posterior. La base metálica fue recortada en unidades con las dimensiones sugeridas en la norma ASTM G65, a partir de una platina de acero A-36 y con dimensiones 25,4 mm x 6000 mm x 3 mm.

Posteriormente se procedió a limpiar la superficie que estará en contacto con la silicona mediante el uso de un desengrasante industrial para finalmente ser insertadas en un molde fabricado en balsa y con las dimensiones requeridas para que sobre la superficie limpia fuera depositado un recubrimiento de silicona RTV de 5 mm de altura. La ficha técnica de la silicona sugiere un tiempo de curado mínimo de 24 horas a temperatura ambiente. Sin embargo en este caso, el tiempo de curado fue de 72 horas a temperatura ambiente.

Figura 2-14. Muestras con recubrimiento de silicona.



2.4 Pesaje de las unidades muestrales

Previo al montaje del experimento, se realizó el pesaje de todas las unidades muestrales en el laboratorio de control de calidad de Holcim Colombia S.A. planta Nobsa, en la balanza “SARTORIUS ED2245” Figura 2-15 y realizadas bajo condiciones de temperatura ambiente.

Figura 2-15. Pesaje inicial de unidades muestrales en balanza.



2.5 Montaje del experimento

Se dispuso la instalación de las unidades muestrales durante las 8 horas de parada programada para mantenimiento del Molino Vertical F. L. Smidth OK - 36 para Cemento, el

23 de Febrero de 2015. Se asignó un grupo de dos mecánicos de mantenimiento para efectuar la instalación.

En primer lugar se escogieron los lugares para la instalación tal como se muestra en la Figura 2-16. Con el propósito de cumplir el diseño planteado en el experimento se seleccionaron 9 posiciones a las que en adelante se les llamará grupos y que permitieron incorporar las 27 combinaciones.

Posteriormente se realizó la aleatorización de cada unidad muestral de cada material para ser ubicadas en cada uno de los grupos; de esta manera las 63 unidades de cada material quedaron distribuidas en cada uno de los 9 grupos como lo muestra la Tabla 2-3. La figura 2-17 permite evidenciar la instalación de las unidades muestrales sobre la pared del molino, dentro de la cámara de molienda.

Tabla 2-3. Grupos de muestras con la ubicación aleatorizada dentro de cada grupo.

	Polimérica	Revestida	Termotratada		Polimérica	Revestida	Termotratada		Polimérica	Revestida	Termotratada
GRUPO 1	1	61	32	GRUPO 2	11	27	41	GRUPO 3	20	45	29
	4	44	27		58	12	14		26	37	43
	5	19	61		60	14	16		18	1	36
	28	33	62		61	60	24		14	31	58
	43	7	56		47	63	44		12	55	34
	40	2	13		31	41	11		32	10	5
21	58	46	42	39	53	3	62	33			
GRUPO 4	46	3	18	GRUPO 5	49	6	31	GRUPO 6	35	34	7
	53	9	8		45	43	51		44	20	63
	50	50	38		15	26	50		50	52	3
	25	36	21		16	15	22		9	46	25
	63	48	55		17	38	4		39	5	12
	38	59	2		55	23	1		59	54	45
41	24	10	6	30	48	22	21	15			
GRUPO 7	23	51	57	GRUPO 8	62	32	28	GRUPO 9	13	40	19
	54	42	35		51	29	17		30	49	37
	48	11	59		8	22	47		33	25	9
	37	8	39		52	57	60		29	28	23
	36	16	6		24	13	40		57	56	26
	7	4	30		10	47	42		2	18	54
19	35	49	34	17	52	27	53	20			

	L. Termotratada
	L Recubierta
	Polimérica

Posteriormente se realizó la aleatorización de las 7 réplicas de cada material dentro de cada uno de los grupos para definir su orden de instalación.

Figura 2-16. Alistamiento de unidades muestrales y montaje en posiciones seleccionadas.



Se empezaron a instalar las probetas formando cada grupo de unidades muestrales, pero durante la instalación del primer grupo de unidades muestrales, operaciones de planta solicitó avanzar con mayor velocidad dado que requerían poner en marcha antes de las 8 horas. Viendo la cantidad de trabajo y el recorte en el tiempo, se decide ubicar la mayor cantidad de grupos que resultara representativo en cuanto a todas las velocidades y todas las posiciones sobre la circunferencia del molino basados en el diseño. De igual manera se decide quitar dos réplicas por tratamiento. Así, las unidades muestrales instaladas finales son las que se presentan en la Tabla 2-4.

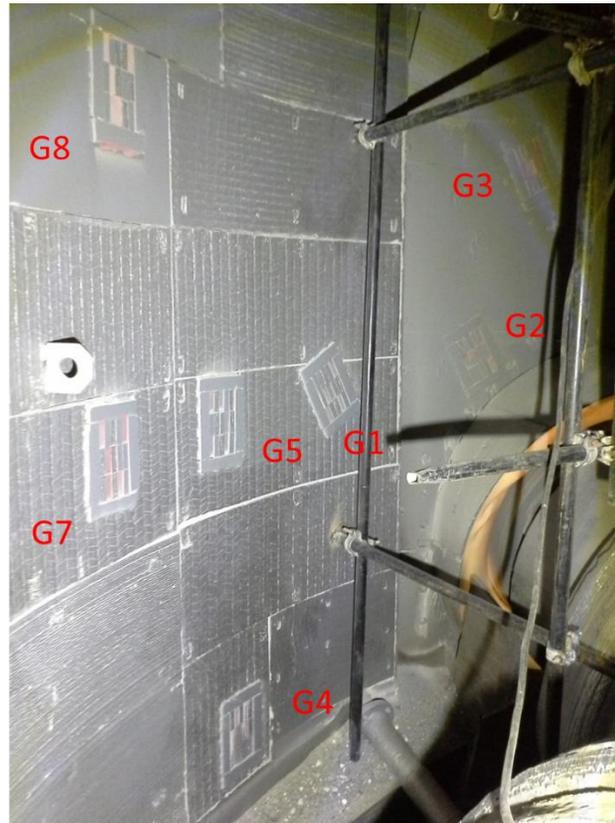
Tabla 2-4. Unidades muestrales definitivas instaladas.

Grupo 1	61	44	32	19	28	Grupo 2	27	12	41	11	14	Grupo 3	29	45	37	43	20
	33	4	43	27	61		58	61	60	63	14		26	55	18	14	36
	1	62	7	5	56		16	24	60	44	47		1	12	58	31	34
Grupo 4	18	46	8	53	3	Grupo 5	49	6	45	31	43	NO SE MONTA GRUPO 6 NI GRUPO 9					
	50	50	55	25	9		51	26	50	15	15						
	48	63	59	21	10		16	22	38	17	4						
Grupo 7	23	57	51	35	54	Grupo 8	62	28	32	29	51						
	42	48	11	59	39		17	8	22	47	57						
	8	37	16	36	6		60	52	24	13	40						

	L. Termotratada
	L Recubierta
	Polimérica

Al final, el experimento consideró las 3 velocidades planteadas, las 3 posiciones alrededor de la circunferencia y los 3 materiales pero no basados en el modelo factorial inicial del diseño.

Figura 2-17. Fotografía unidades instaladas en el molino antes del desmontaje.



De esta forma, se planteó establecer un análisis comparativo del desempeño de los tres materiales por grupo, por velocidad, e incluso por posición.

- Condiciones del Experimento

El experimento se montó el día 23 de Febrero de 2015, y fue desmontado el día 15 de Marzo de 2015 luego de 20 días de operación del molino. En la Tabla 2-5 se encuentra el resumen de las condiciones relevantes de operación. Es de anotar, que la temperatura corresponde al promedio de la temperatura a la salida del molino, en la parte superior del molino posterior al proceso de separación, en el ducto de salida, cuando ya es producto final.

Tabla 2-5. Condiciones de operación del molino.

Material molido	97.741 ton
Horas de Operación	670 horas
Temperatura promedio	83°C

El material molido corresponde a la cantidad de toneladas totales de los diferentes tipos de cemento fabricados durante el período de tiempo dado. En la Tabla 2-6 se pueden ver los valores porcentuales ponderados de cada uno de los elementos utilizados para la fabricación de los cementos que fueron producidos durante el período de tiempo definido para el experimento del proyecto.

Tabla 2-6. Materias primas usadas en la fabricación del cemento.

Clinker	69%
Caliza	18%
Puzolana y Escoria	8%
Yeso	5%

2.6 Desmontaje del experimento y pesaje

El día 15 de Marzo de 2015 se procede a desmontar el experimento; sabiendo que finalmente se hizo el montaje de 120 probetas, se efectúa la recolección de 97 unidades muestrales y posterior pesaje de cada una de las mismas en la balanza “SARTORIUS ED2245”, que se puede observar en la Figura 2-18, de manera que se pueda determinar el cambio en el peso de cada una de las probetas luego de ser sometidas al proceso erosivo bajo las condiciones mencionadas en el apartado anterior.

El cambio en el número de probetas recogidas al finalizar el experimento se redujo en 23 unidades, las cuales son correspondientes con el retiro de 15 unidades muestrales de un grupo completo, el grupo 6, el cual fue eliminado durante el proceso de experimentación pues la lámina sobre la cual fue montado el grupo fue cambiada totalmente. De otro lado, las otras siete corresponden a cualquier grupo dentro de él mismo

Figura 2-18. Pesaje final de unidades muestrales en balanza.



2.7 Estereoscopia

El análisis estereoscópico se realizó en el laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Cada una de las 97 probetas desmontadas, luego de ser pesadas, fueron sometidas de manera individual a un registro fotográfico general, el cual se encuentra en el Anexo F.

Posteriormente, se inspeccionaron individualmente en un equipo para estereoscopia Olympus SZX12, Figura 2-19, en el cual cada probeta fue montada, inspeccionada y fotografiada finalmente en los lugares de la superficie en los cuales se aprecian detalles significativos que merecen especial atención. Cada probeta fue observada a 1X, 20X, 50X y 90X. Las imágenes correspondientes se adjuntan en el Anexo G.

Figura 2-19. Estereoscopio Olympus SZX12.



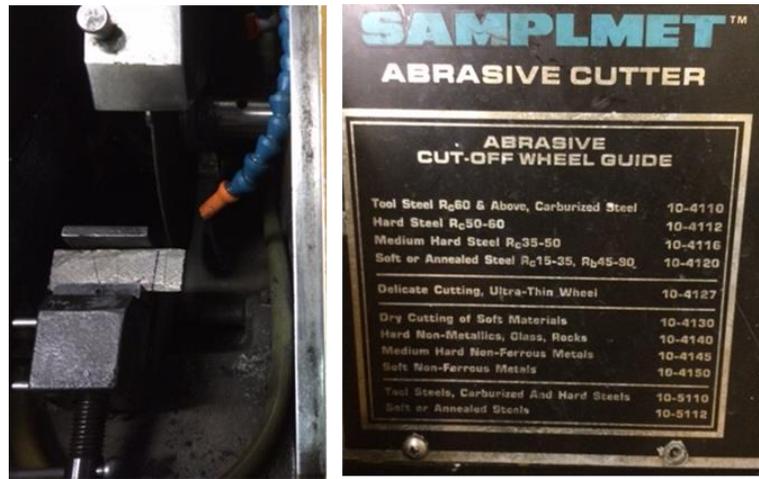
Al finalizar la inspección y análisis de cada unidad muestral, se procedió a realizar limpieza superficial de cada una, mediante la utilización de agua y cepillo de cerdas esto con el fin de retirar impurezas.

2.8 Corte de probetas

Se realizó la selección de las probetas más representativas de cada grupo y cada material por grupo, teniendo en cuenta que fueron las unidades muestrales que presentaron la mayor desviación con respecto a la media de pérdida de peso de dicho material en cada grupo, en total 21 unidades experimentales. Así, posteriormente se procedió a realizar el alistamiento de cada una de ellas para los análisis SEM, Espectrometría de emisión atómica (para las probetas metálicas), espectrometría de infrarrojo (para las probetas poliméricas) y análisis Metalográficos correspondientes.

Los cortes para los materiales con características metálicas, se realizaron en una cortadora abrasiva marca BUEHLER SAMPLEMET, Abrasive Cutter, usando un disco de corte 10-4110, con especificación para cortes de materiales acerados carburados con durezas RHC 60 y superiores. En la Figura 2-20 se puede observar el soporte en donde se montaron las unidades muestrales para realizar el proceso de corte.

Figura 2-20. Cortadora marca BUEHLER SAMPLEMET, Abrasive Cutter.



2.9 Metalografía

La metalografía se realizó a las 14 probetas metálicas seleccionadas por cada grupo. Las probetas fueron organizadas de acuerdo con su material, recubiertas y termotratadas, para ser montadas en dos tabletas de resina epóxica para ser analizadas metalográficamente. La disposición fue la presentada en la Figura 2-21.

La mezcla fue una preparación de 100 partes de resina epóxica BUEHLER Epoxy Resin 20-8150-032 por 28 partes de endurecedor BUEHLER Epoxi Hardener 20-8152-008, y curada durante 12 horas.

Figura 2-21. Muestras listas para que sea aplicada la resina.



Luego del tiempo de curado, son retiradas del molde y se procede a la preparación superficial mediante pulimento, utilizando papel de lija de diferentes granulometrías, desde N°80, N°150, N°240, N°420, N°600, N°1200 y paño.

El objetivo fundamental del análisis metalográfico fue la determinación de la microestructura y complementar lo pertinente para así determinar finalmente el/los mecanismos de desgaste.

2.10 Microscopía electrónica de barrido SEM

El análisis SEM se realizó a las 21 unidades muestrales seleccionadas dentro de los 7 grupos. Para ello, se tomaron pequeñas muestras de cada probeta, siendo cortadas de la misma manera que para el análisis metalográfico y observadas en un equipo SEM FEI QUANTA 200, de la Universidad Nacional de Colombia Figura 2-22. Mediante las imágenes SEM se pretendió analizar la superficie de las probetas y así ver la respuesta de cada uno de los materiales a condiciones similares de abrasión, en busca de información relevante para determinar como objetivo primordial determinar el/los mecanismos de desgaste prevalecientes. La totalidad de las fotografías pueden observarse en el Anexo H de este documento.

Figura 2-22. Equipo SEM FEI QUANTA 200.

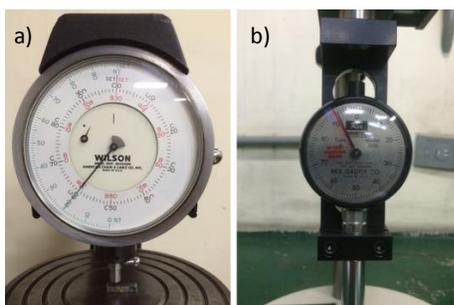


2.11 Dureza

Las mediciones de dureza de los materiales se realizan sobre la superficie expuesta al proceso de erosión, de una sección de muestra de cada uno de los tres materiales y de las muestras seleccionadas por cada grupo.

Para el caso de las muestras metálicas, se hace la medición en un durómetro marca Wilson, modelo 3TTBB el cual se aprecia en la Figura 2-23 a. La medición sobre la muestra polimérica se efectuó en un durómetro marca REX, modelo B-1 Stand, que se aprecia en la Figura 2-23 b. Los dos equipos pertenecientes a la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 2-23. a) Durómetro Wilson, modelo 3TTBB. b) Durómetro REX modelo B-1



2.12 Espectroscopia

Para la determinación de la composición química de los materiales de las muestras de tipo metálico se realizaron análisis de espectroscopia por emisión óptica, para lo cual se utilizó un equipo marca BAIRD DV 4, del laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Universidad Nacional de Colombia.

Así mismo, para la determinación de la composición química de las muestras poliméricas, se utilizó un equipo Thermo Scientific Nicolet iS10 con un módulo de ATR verificado con patrones de Poliestireno 1.5 mm trazables a los estándares NIST, del laboratorio de Espectrofotometría Infrarroja de la Universidad Nacional de Colombia.

3. Resultados

3.1 Pesaje

3.1.1 Peso Inicial

El día 22 de Febrero de 2015 se realizó el pesaje de todas las unidades muestrales a ser instaladas, en una báscula “SARTORIUS ED2245”, de propiedad de Holcim Colombia y ubicada en el laboratorio de control de calidad de la Planta de Nobsa. Las condiciones ambientales controladas en 22°C de temperatura y humedad relativa de 51%.

Las unidades muestrales se dividieron en tres grupos, uno por cada material y con los pesos medidos en las Tabla 3-1, Tabla 3-2 y Tabla 3-3.

Tabla 3-1. Pesos iniciales para muestras de lámina termotrataada

TERMOTRATADA					
# muestra	peso gr	# muestra	peso gr	# muestra	peso gr
1	138,398	22	131,014	43	131,195
2	132,125	23	135,589	44	134,062
3	142,244	24	137,312	45	133,258
4	135,014	25	142,581	46	137,254
5	133,251	26	133,844	47	129,921
6	131,91	27	128,854	48	134,852
7	135,964	28	132,821	49	131,921
8	132,149	29	132,716	50	129,651
9	132,995	30	131,209	51	132,379
10	141,524	31	138,853	52	133,467
11	135,163	32	135,121	53	132,694
12	131,673	33	129,474	54	135,643
13	134,531	34	133,839	55	131,319
14	134,99	35	137,752	56	133,648
15	133,441	36	135,487	57	132,094
16	132,876	37	134,834	58	134,728
17	131,998	38	133,939	59	131,329
18	131,781	39	136,108	60	128,309
19	128,997	40	130,725	61	137,847
20	136,243	41	135,785	62	132,983
21	133,188	42	132,275	63	134,588

Tabla 3-2. Pesos iniciales para muestras recubiertas con soldadura.

RECUBIERTA CON SOLDADURA					
# muestra	peso gr	# muestra	peso gr	# muestra	peso gr
1	127,498	22	132,283	43	111,023
2	124,188	23	127,255	44	126,435
3	130,969	24	132,82	45	125,908
4	122,928	25	129,865	46	123,565
5	127,44	26	133,669	47	114,795
6	116,064	27	124,231	48	127,657
7	129,06	28	131,456	49	136,634
8	139,123	29	130,261	50	128,311
9	127,902	30	129,931	51	129,929
10	131,348	31	124,709	52	129,514
11	131,261	32	125,241	53	135,408
12	128,944	33	110,55	54	134,606
13	128,364	34	113,266	55	128,897
14	131,774	35	130,454	56	125,851
15	124,502	36	121,55	57	128,593
16	127,85	37	128,586	58	132,884
17	118,468	38	129,915	59	133,77
18	124,903	39	132,445	60	124,016
19	128,306	40	124,548	61	132,606
20	128,741	41	116,587	62	128,352
21	124,509	42	127,254	63	131,723

Tabla 3-3. Pesos iniciales para muestras poliméricas. (Incluye el metal base más la cubierta de silicona)

SILICONA					
# muestra	peso gr	# muestra	peso gr	# muestra	peso gr
1	54,474	22	55,667	43	55,879
2	60,656	23	56,355	44	55,372
3	54,401	24	54,898	45	56,034
4	56,512	25	54,361	46	54,19
5	56,325	26	55,549	47	54,106
6	56,081	27	55,785	48	56,709
7	55,738	28	55,838	49	55,126
8	53,322	29	55,224	50	56,703
9	55,845	30	55,184	51	55,734
10	54,603	31	53,328	52	55,576
11	55,582	32	54,795	53	54,535
12	54,089	33	55,243	54	55,211
13	55,946	34	61,065	55	55,737
14	55,117	35	54,964	56	54,378
15	55,003	36	56,242	57	55,066
16	54,791	37	55,759	58	55,448
17	53,357	38	55,512	59	55,642
18	54,095	39	55,075	60	56,546
19	54,526	40	55,125	61	54,805
20	55,742	41	55,729	62	55,658
21	54,463	42	55,034	63	55,285

3.1.2 Peso Final

El experimento fue retirado el día 15 de Marzo de 2015. Las probetas que fueron utilizadas de acuerdo con el diseño de experimentos, la aleatorización y cambios en el número de réplicas debidas a requerimientos de producción de Holcim, se pesan inmediatamente después de ser retiradas del molino, en la báscula “SARTORIUS ED2245”, de propiedad de Holcim Colombia y ubicada en el laboratorio de control de calidad de la Planta de Nobsa. Se verificó que las condiciones de temperatura y de humedad relativa fueran las mismas que en el pesaje inicial, correspondientes a 22 °C y 51% respectivamente.

Tal como se planteó en el capítulo anterior, por diversos factores operativos se hizo la instalación de 7 grupos, a partir de los cuales se presenta el resumen en las Tabla 3-4, Tabla 3-5, Tabla 3-6, Tabla 3-7, Tabla 3-8, Tabla 3-9 y Tabla 3-10, grupo a grupo, teniendo en cuenta tanto los pesos iniciales respectivos de cada unidad y adicionando los pesos finales, posteriores al desmonte del experimento.

Tabla 3-4. Resumen de pesos para muestras Grupo 1.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
27	128,8540	122,7850	6,0690	4,7100%	0,2398	0,0575
32	135,1210	130,9582	4,1628	3,0808%	-1,6664	2,7770
56	133,6480	128,6093	5,0387	3,7701%	-0,7905	0,6250
61	137,8470	127,7944	10,0526	7,2926%	4,2234	17,8368
62	132,9830	129,1599	3,8231	2,8749%	-2,0061	4,0246

$$\bar{X} = 5,82924$$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
33	110,5500	110,2375	0,3125	0,2827%	-0,1744	0,0304
44	126,4350	125,7695	0,6655	0,5264%	0,1786	0,0319
19	128,3060	127,7806	0,5254	0,4095%	0,0385	0,0015
61	132,6060	132,2342	0,3718	0,2804%	-0,1151	0,0132
7	129,0600	128,5008	0,5592	0,4333%	0,0723	0,0052

$$\bar{X} = 0,48688$$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
1	54,4740	46,9920	10,0192	2,5372	7,4820	13,7351%	-2,3540	5,5411
4	56,5120	45,5734	12,0572	1,1186	10,9386	19,3563%	1,1026	1,2158
5	56,3250	46,5202	11,8702	2,0654	9,8048	17,4076%	-0,0312	0,0010
28	55,8380	46,3078	11,3832	1,8530	9,5302	17,0677%	-0,3058	0,0935
43	55,8790	44,4548	11,4242	0,0000	11,4242	20,4446%	1,5882	2,5225

$$\bar{X} = 9,836$$

Tabla 3-5. Resumen de pesos para muestras Grupo 2.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
14	134,9900	131,9813	3,0087	2,2288%	-0,9662	0,9335
16	132,8760	128,8929	3,9831	2,9976%	0,0082	0,0001
24	137,3120	130,3876	6,9244	5,0428%	2,9495	8,6996
41	135,7850	132,837	2,948	2,1711%	-1,0269	1,0545
44	134,0620	131,0517	3,0103	2,2455%	-0,9646	0,9305

$$\bar{X} = 3,9749$$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
12	128,9440	128,4151	0,5289	0,4102%	0,1109	0,0123
14	131,7740	131,4482	0,3258	0,2472%	-0,0922	0,0085
27	124,2310	123,9873	0,2437	0,1962%	-0,1743	0,0304
60	124,0160	123,6056	0,4104	0,3309%	-0,0076	0,0001
63	131,7230	131,1420	0,5810	0,4411%	0,1630	0,0266

$$\bar{X} = 0,41796$$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
11	55,5820	46,4753	11,1272	2,0205	9,1067	16,3843%	0,1090	0,0119
47	54,1060	47,2863	9,6512	2,8315	6,8197	12,6044%	-2,1780	4,7439
58	55,4480	45,7884	10,9932	1,3336	9,6596	17,4211%	0,6619	0,4381
60	56,5460	46,3255	12,0912	1,8707	10,2205	18,0747%	1,2228	1,4951
61	54,8050	45,6228	10,3502	1,1680	9,1822	16,7544%	0,1845	0,0340

$$\bar{X} = 8,99778$$

Tabla 3-6. Resumen de pesos para muestras Grupo 3.

Termotrataada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
29	132,7160	130,6324	2,0836	1,5700%	0,2554	0,0652
34	133,8390	131,9723	1,8667	1,3947%	0,0385	0,0015
36	135,4870	133,7233	1,7637	1,3017%	-0,0645	0,0042
43	131,1950	129,2446	1,9504	1,4866%	0,1222	0,0149
58	134,7280	133,2516	1,4764	1,0958%	-0,3518	0,1237

$$\bar{X} = 1,82816$$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
31	124,7090	124,5650	0,1440	0,1155%	-0,1240	0,0154
37	128,5860	128,3134	0,2726	0,2120%	0,0046	0,0000
45	125,9080	125,5315	0,3765	0,2990%	0,1085	0,0118
1	127,4980	127,2190	0,2790	0,2188%	0,0110	0,0001
			0,2680			

$$\bar{X} = 0,2680$$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
12	54,0890	50,9688	9,6342	6,5140	3,1202	5,7687%	-1,0075	1,0151
14	55,1170	51,1721	10,6622	6,7173	3,9449	7,1574%	-0,1828	0,0334
18	54,0950	49,5504	9,6402	5,0956	4,5446	8,4012%	0,4169	0,1738
20	55,7420	51,0536	11,2872	6,5988	4,6884	8,4110%	0,5607	0,3144
26	55,5490	51,2085	11,0942	6,7537	4,3405	7,8139%	0,2128	0,0453

$$\bar{X} = 4,12776$$

Tabla 3-7. Resumen de pesos para muestras Grupo 4.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
8	132,149	126,3814	5,7676	4,3645%	1,16	1,35
18	131,781	128,3376	3,4434	2,6130%	-1,16	1,35

$$\bar{X} = 4,6055$$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
3	130,9690	130,3370	0,6320	0,4826%	-0,0066	0,0000
9	127,9020	127,2568	0,6452	0,5044%	0,0066	0,0000
			0,6386			
			1,2772			

$$\bar{X} = 0,6386$$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
50	56,7030	48,5336	12,2482	4,0788	8,1694	14,4074%	0,2758	0,0761
25	54,3610	45,4259	9,9062	0,9711	8,9351	16,4367%	1,0415	1,0847
46	54,1900	47,1682	9,7352	2,7134	7,0218	12,9578%	-0,8718	0,7600
53	54,5350	47,0869	10,0802	2,6321	7,4481	13,6575%	-0,4455	0,1985

$$\bar{X} = 7,89364$$

Tabla 3-8. Resumen de pesos para muestras Grupo 5.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
4	135,0140	123,1608	11,8532	8,7792%	1,4445	2,0866
22	131,0140	118,8206	12,1934	9,3069%	1,7847	3,1852
31	138,8530	129,1260	9,7270	7,0053%	-0,6817	0,4647
50	129,6510	121,6180	8,0330	6,1959%	-2,3757	5,6439
51	132,3790	122,1422	10,2368	7,7329%	-0,1719	0,0295

$\bar{X} = 10,40868$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
6	116,0640	115,5003	0,5637	0,4857%	-0,0849	0,0072
15	124,5020	123,3268	1,1752	0,9439%	0,5266	0,2773
38	129,9150	129,1951	0,7199	0,5541%	0,0713	0,0051
26	133,6690	133,2563	0,4127	0,3087%	-0,2359	0,0557
43	111,0230	110,6513	0,3717	0,3348%	-0,2769	0,0767

$\bar{X} = 0,64864$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
15	55,0030	45,2851	10,5482	0,8303	9,7179	17,6680%	0,5649	0,3191
17	53,3570	45,6432	8,9022	1,1884	7,7138	14,4570%	-1,4392	2,0712
16	54,7910	45,5943	10,3362	1,1395	9,1967	16,7851%	0,0437	0,0019
49	55,1260	46,3731	10,6712	1,9183	8,7529	15,8781%	-0,4001	0,1601
45	56,0340	45,6504	11,5792	1,1956	10,3836	18,5310%	1,2306	1,5144

$\bar{X} = 9,15302$

Tabla 3-7. Resumen de pesos para muestras Grupo 7.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
6	131,9100	125,5723	6,3377	4,8046%	1,6723	2,7967
35	137,7520	135,5839	2,1681	1,5739%	-2,4973	6,2363
39	136,1080	130,6081	5,4999	4,0408%	0,8345	0,6965
57	132,0940	126,6428	5,4512	4,1268%	0,7858	0,6175
59	131,3290	127,4591	3,8699	2,9467%	-0,7955	0,6328

$\bar{X} = 4,6654$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
11	131,2610	130,9503	0,3107	0,2367%	-0,0451	0,0020
16	127,8500	127,2607	0,5893	0,4609%	0,2335	0,0545
42	127,2540	127,0820	0,1720	0,1352%	-0,1838	0,0338
51	129,9290	129,6165	0,3125	0,2405%	-0,0433	0,0019
8	139,1230	138,7283	0,3947	0,2837%	0,0389	0,0015

$\bar{X} = 0,35584$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
36	56,2420	47,1008	11,7872	2,6460	9,1412	16,2534%	3,8760	15,0231
37	55,7590	50,2144	11,3042	5,7596	5,5446	9,9439%	0,2794	0,0780
48	56,7090	52,3615	12,2542	7,9067	4,3475	7,6664%	-0,9177	0,8422
23	56,3550	51,9616	11,9002	7,5068	4,3934	7,7960%	-0,8718	0,7601
54	55,2110	52,3115	10,7562	7,8567	2,8995	5,2517%	-2,3657	5,5967

$\bar{X} = 5,26528$

Tabla 3-10. Resumen de pesos para muestras Grupo 8.

Termotratada						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
17,0000	131,9980	131,3298	0,6682	0,5062%	0,1713	0,0293
28,0000	132,8210	132,2965	0,5245	0,3949%	0,0276	0,0008
40,0000	130,7250	130,3249	0,4001	0,3061%	-0,0968	0,0094
60,0000	128,3090	128,2628	0,0462	0,0360%	-0,4507	0,2031
47,0000	129,9210	129,0755	0,8455	0,6508%	0,3486	0,1215

$$\bar{X} = 0,4969$$

Recubierta con soldadura						
# unidad muestral	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
13	128,3640	128,1567	0,2073	0,1615%	0,0034	0,0000
22	132,2830	132,1794	0,1036	0,0783%	-0,1003	0,0101
29	130,2610	129,9801	0,2809	0,2156%	0,0770	0,0059
32	125,2410	125,0028	0,2382	0,1902%	0,0343	0,0012
57	128,5930	128,4037	0,1893	0,1472%	-0,0146	0,0002

$$\bar{X} = 0,20386$$

Silicona								
# unidad muestral	P _{inicial con base} (gr)	P _{final con base} (gr)	P _{inicial} (gr)	P _{final} (gr)	P _i - P _f (gr)	Variación	Diferencia con \bar{X}	(Diferencia con \bar{X}) ²
8	53,3220	51,0386	8,8672	6,5838	2,2834	4,2824%	-0,4985	0,2485
24	54,8980	51,9107	10,4432	7,4559	2,9873	5,4416%	0,2054	0,0422
51	55,7340	53,4363	11,2792	8,9815	2,2977	4,1227%	-0,4842	0,2344
52	55,5760	51,4558	11,1212	7,0010	4,1202	7,4137%	1,3383	1,7912
62	55,6580	53,4373	11,2032	8,9825	2,2207	3,9900%	-0,5612	0,3149

$$\bar{X} = 2,7819$$

3.2 Variables que dominan el efecto erosivo

3.2.1 Velocidad de las partículas erosivas.

La Figura 3-1 presenta un perfil de velocidad de las partículas erosivas, el cual fue tomado mediante un tubo de Pitot por el departamento de ingeniería de procesos de Holcim Colombia S.A. en Abril de 2015.

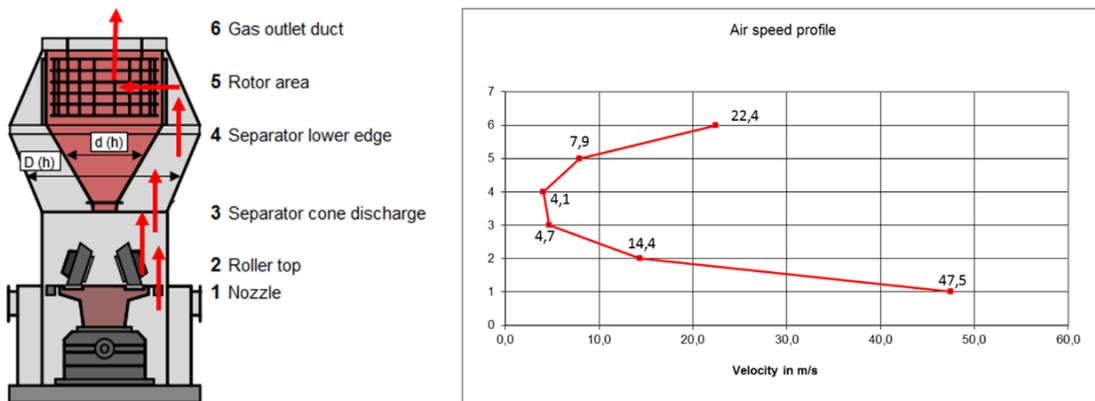
El experimento se llevó a cabo en las paredes de la cámara de molienda, influenciadas por las velocidades, v_1 la velocidad del flujo en la zona inmediata a las boquillas de salida de gases hacia la cámara de molienda y que incide sobre el grupo 4; v_2 la velocidad en la parte alta de los rodillos que afecta a los Grupos 1, 2, 5, y 7; v_3 velocidad del flujo en la parte baja de la descarga del cono de separador en donde están instalados los grupos 3 y 8. La Figura 3-1 ilustra el perfil de velocidades medido al interior de la cámara de molienda.

3.2.2 Tipo flujo del erosivo

El cálculo del tipo de flujo del erosivo se realiza para conocer el comportamiento del mismo, debido al paso por las boquillas de salida hacia la cámara de molienda. En primer lugar y teniendo en cuenta que la manera para establecer el tipo de flujo es mediante la determinación del número de Reynolds, se calcula éste, mediante la Ecuación (3.1)], la cual fue detallada en el capítulo anterior:

$$R = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (3.1)$$

Figura 3-1. Perfil de velocidad del flujo de erosivo. Información de proceso.



Debido a que la tubería en este caso es la salida de una boquilla de sección rectangular, se debe calcular el diámetro equivalente a partir de la Ecuación (3.2)

$$d_e = \frac{4A}{p} \quad (3.2)$$

De la Figura 3-2 se tienen las dimensiones para calcular el diámetro equivalente así:

$$W = 0,47 \text{ metros}; \quad h = 0,317 \text{ metros}$$

Por tanto,

$$A = W * h; \quad \text{De donde, } A = 0,47 * 0,317, \quad \text{entonces } A = 0,148 \text{ m}^2$$

Para el caso del perímetro, este será:

$$p = (2 * 0,47) + (2 * 0,317); \quad \text{Entonces, } p = 1,574 \text{ m}$$

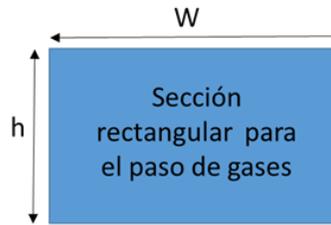
Teniendo ya los valores para reemplazar en la Ecuación (3.2), tendremos entonces que:

$$d_e = \frac{4 * 0,148 \text{ m}^2}{1,574 \text{ m}}$$

El diámetro equivalente será entonces:

$$d_e = 0,3786 \text{ m}$$

Figura 3-2. Dimensiones cálculo del diámetro equivalente.



Al tener ya el valor del diámetro equivalente, procedemos a calcular el número de Reynolds a partir de la Ecuación (3.1)

La Velocidad (v) de los gases a través de la boquilla a partir de la curva de velocidades de la Figura 3-1 es 47,5 m/s.

La densidad (ρ) del fluido es 0,973 kg/m³, que es la densidad del aire a 90 °C. [95]

El fluido que se hace pasar por las boquillas es aire a 90°C, por cuanto la viscosidad dinámica (μ) del aire a esta temperatura es 2,13 Ns/m² * 10⁻⁵ [95]

Reemplazando en la Ecuación (3.1),

$$R = \frac{(47,5 \text{ m/s})(0,3786 \text{ m})(0,973 \text{ kg/m}^3)}{2,13 \text{ Ns/m}^2 * 10^{-5}}$$

Resolviendo, el número de Reynolds para el flujo a través de las boquillas del molino vertical analizado será:

$$R = 824537,56$$

Este valor $R > 20000$ indica que el flujo es severamente turbulento. [46]

El flujo de erosivo está compuesto por Puzolana, Caliza, Escoria y Clinker y las durezas de cada uno de estos materiales se pueden observar en la tabla 3-11

Tabla 3-11. Dureza de las diferentes partículas que componen el flujo erosivo

Material	Prueba y Carga	Dureza
Puzolana	Dureza HV 200gr	854
Caliza	Dureza HV 100gr	184
Escoria	Dureza HV 100gr	765
Clinker	Dureza HV 100gr	521

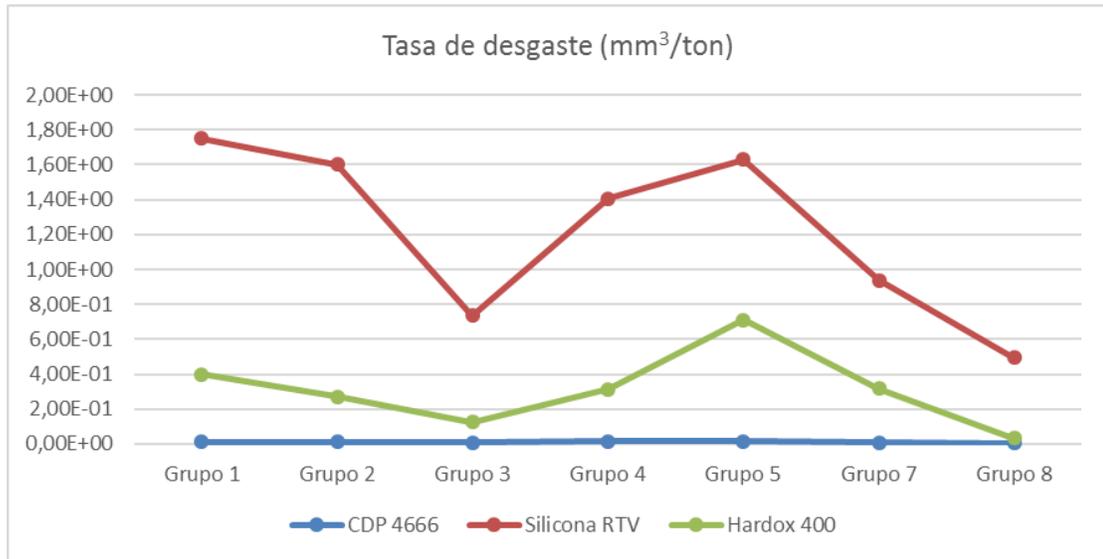
3.3 Tasa de erosión

A partir de los valores de pérdida de peso y teniendo en cuenta la cantidad de material procesado, se calcula la tasa de erosión R en gr/ton para los diferentes materiales en cada uno de los grupos, y los resultados se muestran en Tabla 3-12. La pérdida de peso se toma a partir de la media de las pérdidas de peso de las cinco (5) unidades muestrales de cada material por cada uno de los grupos. Así entonces se estandariza la pérdida de peso de cada material por grupo y por consiguiente se grafica el resultado de la tasa de erosión tal como se puede apreciar en la Figura 3-3.

Tabla 3-12. Tasa de erosión para lámina recubierta, termotratada y silicona.

Lámina Recubierta con soldadura CDP 4666	Posición	mm3/ton	Lámina Termotratada Hardox 400	Posición	mm3/ton	Silicona RTV 5699	Posición	mm3/ton
	Grupo 1	1,27E-02		Grupo 1	1,75E+00		Grupo 1	3,98E-01
	Grupo 2	1,09E-02		Grupo 2	1,60E+00		Grupo 2	2,71E-01
	Grupo 3	6,98E-03		Grupo 3	7,34E-01		Grupo 3	1,25E-01
	Grupo 4	1,66E-02		Grupo 4	1,40E+00		Grupo 4	3,14E-01
	Grupo 5	1,69E-02		Grupo 5	1,63E+00		Grupo 5	7,10E-01
	Grupo 7	9,26E-03		Grupo 7	9,37E-01		Grupo 7	3,18E-01
	Grupo 8	5,31E-03		Grupo 8	4,95E-01		Grupo 8	3,39E-02

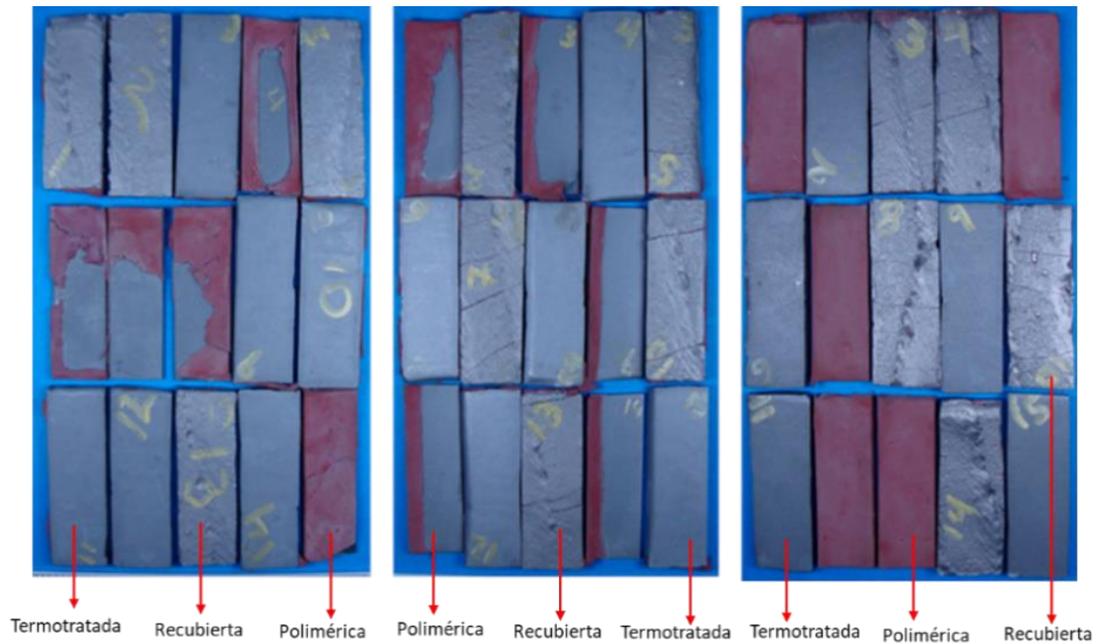
Figura 3-3. Tasa de erosión/desgaste R (mm³/ton).



3.4 Estereoscopia

La estereoscopia busca poder determinar el comportamiento ó afectación superficial de cada material debido a la acción de las partículas erosivas actuando sobre ellas, puntualizando en las zonas en las cuales hay detalles que merecen especial atención. En la Figura 3-4 se observan fotografías representativas de los grupos 2, 5 y 8, en condición normal; la totalidad de las fotografías se pueden apreciar en el anexo I. En estas fotografías se aprecia la superficie de cada unidad muestral y permite hacer una revisión inicial al estado de las superficies y a partir de ella tener una idea preliminar de la agresividad del proceso de desgaste erosivo.

Figura 3-4. Fotografía láminas muestrales grupo 2,5 y 8.



Como bien se mencionó en el procedimiento experimental, luego de la fotografía de las superficies a 1X, se procedió a analizar las superficies con más detalle. En la Figura 3-5, Figura 3-6, Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9, Figura 3-10, Figura 3-11 y Figura 3-12 se observan fotografías a 90X de las superficies de cada unidad muestral seleccionada por cada grupo (para láminas termotradas, recubiertas por soldadura y silicona).

En la Figura 3-13, Figura 3-14, Figura 3-15 y Figura 3-16 se observan fotografías de estereoscopio para las probetas de silicona, amplificadas a 20X. La totalidad de las fotografías de las observaciones en el estereoscopio se adjuntan en el Anexo G.

Figura 3-5. Fotografía probeta, lámina recubierta grupo 4.

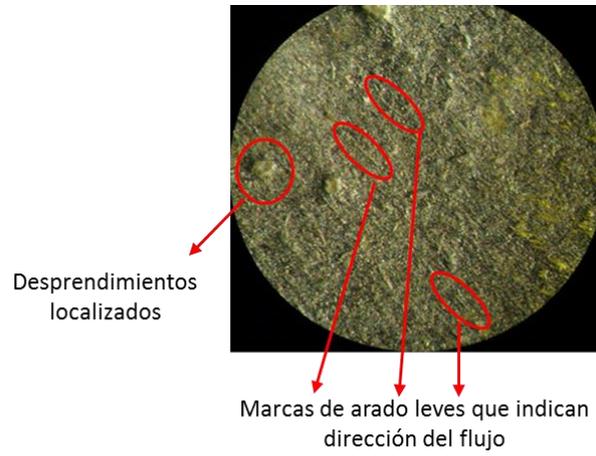


Figura 3-6. Fotografía probeta, lámina recubierta grupo 1 y 2.



Figura 3-7. Fotografía probeta, lámina recubierta grupo 5 y 7.



Figura 3-8. Fotografía probeta, lámina recubierta grupo 3 y 8.



Figura 3-9. Fotografía probeta, lámina termotratada grupo 4.

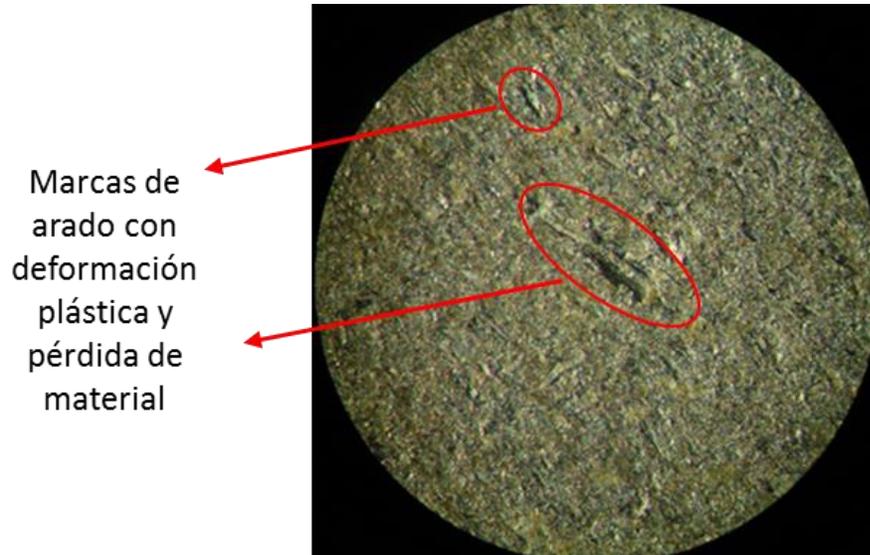


Figura 3-10. Fotografía probeta, lámina termotratada grupo 1 y 2.



Figura 3-11. Fotografía probeta, lámina termotratada grupo 5 y 7.



Figura 3-12. Fotografía probeta, lámina termotratada grupo 3 y 8.

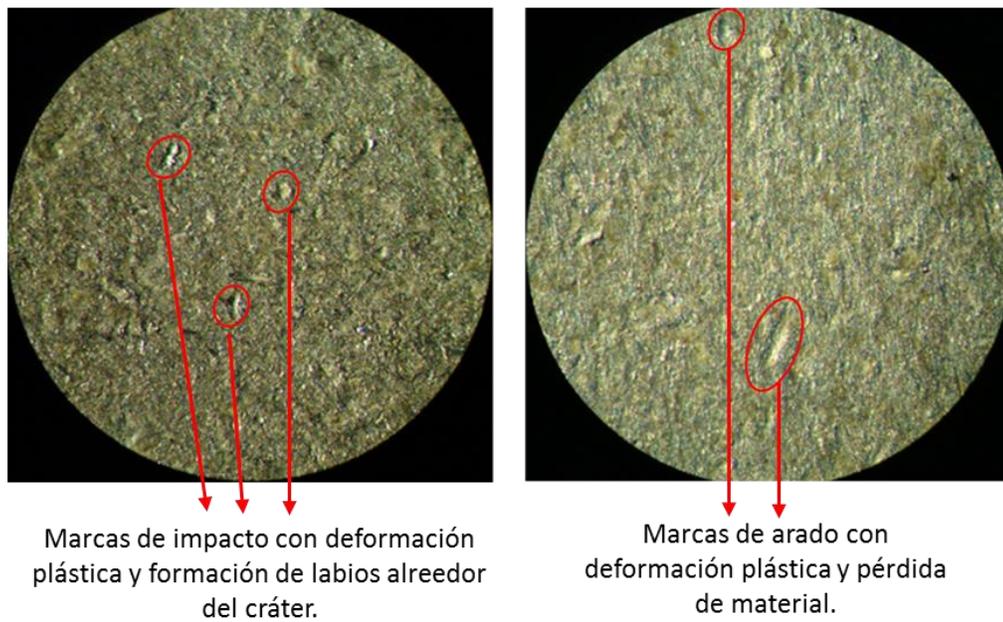
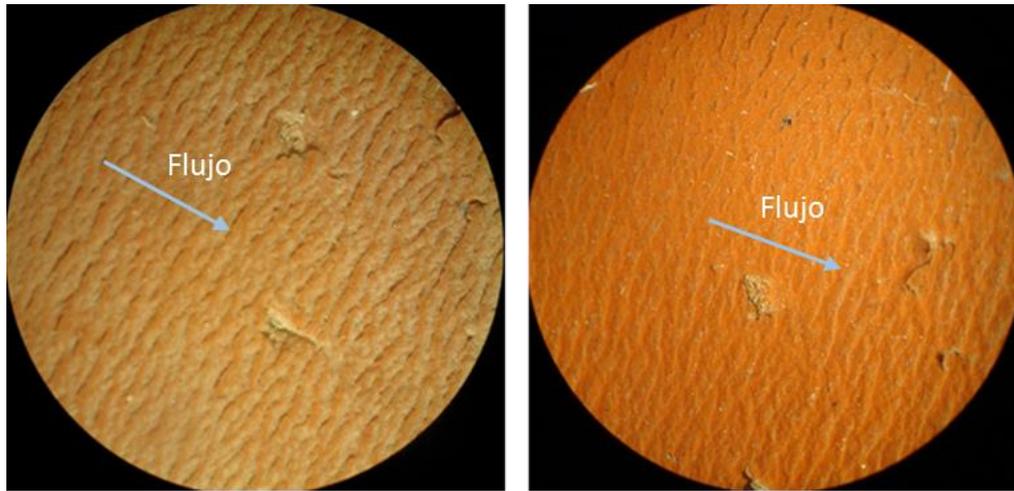
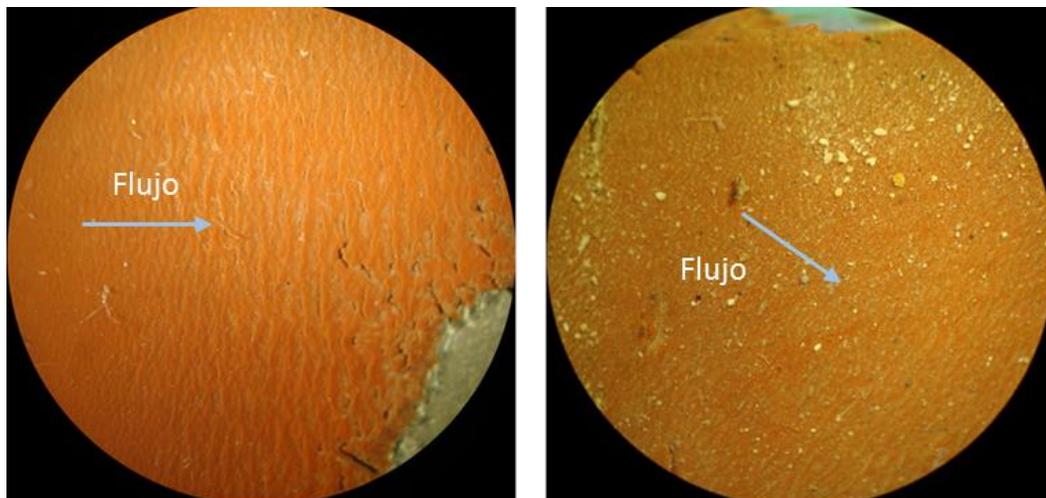


Figura 3-13. Fotografía probeta, lámina polimérica grupo 4.



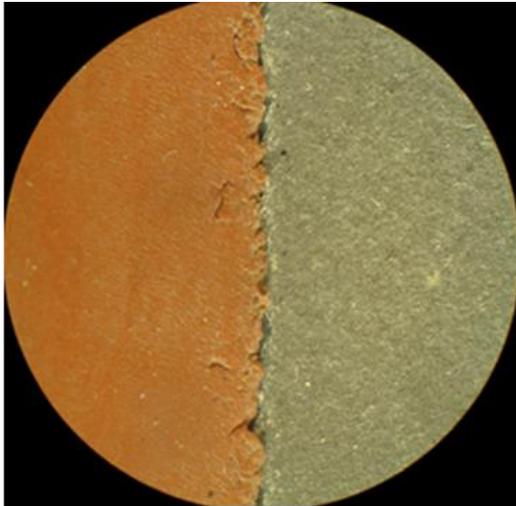
Ondas características del mecanismo de desgaste preponderante:
Fisuración sucesiva con posterior pérdida de material

Figura 3-14. Fotografía probeta, lámina polimérica grupo 1 y 2.

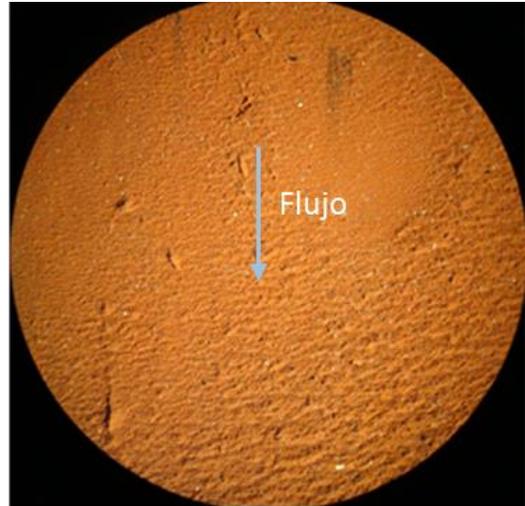


Dirección de flujo perpendicular a las marcas de playa. Más severo en
la probeta del grupo 1 respecto a la del grupo 2

Figura 3-15. Fotografía probeta, lámina polimérica grupo 5 y 7.

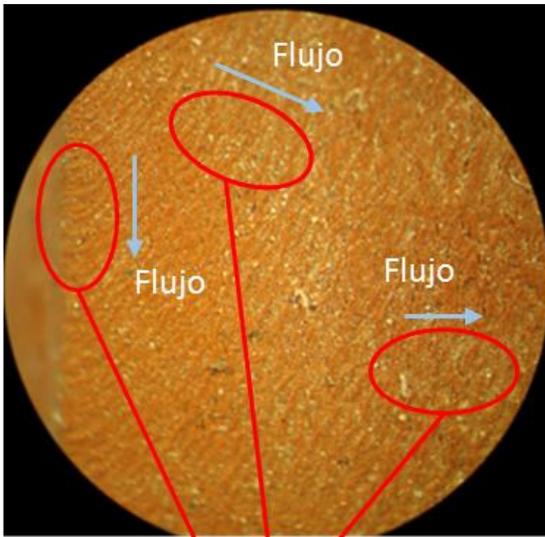


Desgaste severo, se eliminó el recubrimiento casi en su totalidad

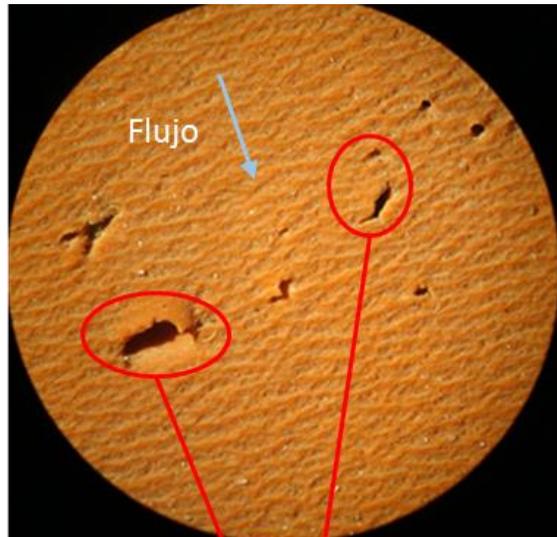


Leve evidencia de la dirección de flujo; baja severidad de la erosión

Figura 3-16. Fotografía probeta, lámina polimérica grupo 3 y 8.



Direcciones de flujo diferentes



Flujo en dirección vertical, cortes y daños superficiales agrestes

3.5 Metalografía

Desde el punto de vista metalográfico, se puede identificar el tipo de estructura y la distribución de fases en cada uno de los materiales metálicos, tanto al interior como en sus bordes sometidos a la acción de las partículas de erosivo. La figura 3-17 muestra de manera general las características micrográficas del recubrimiento, en donde se puede evidenciar la formación de carburos de cromo en diferentes orientaciones y proporciones. Así mismo, la figura 3-18 muestra las imágenes metalográficas de los bordes de las caras de trabajo de las probetas sometidas al flujo de gases dentro del molino. Se puede apreciar también de manera general el comportamiento a partir de la concentración de los carburos cromo en donde se evidencia fractura en aquellos bordes con mayor presencia de dichos carburos y en donde estos son de mayor tamaño. La totalidad de metalografías realizadas se pueden observar en el Anexo I.

Figura 3-17. Metalografías Lámina Recubierta con Soldadura

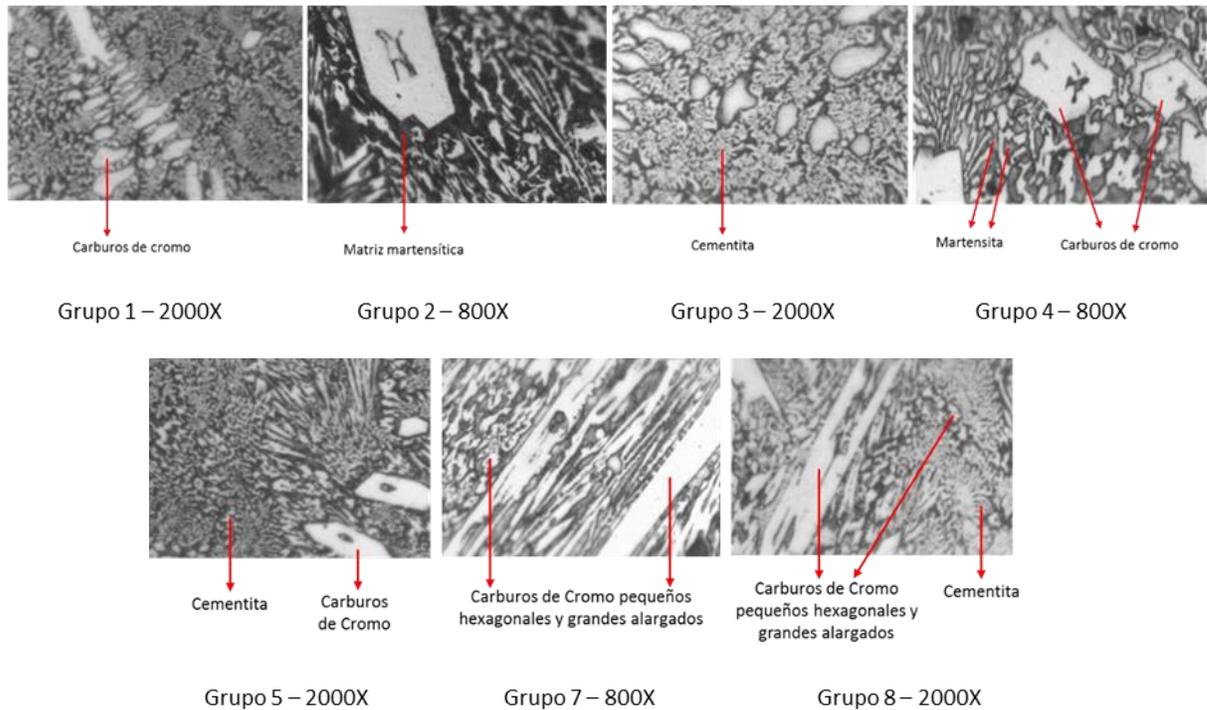
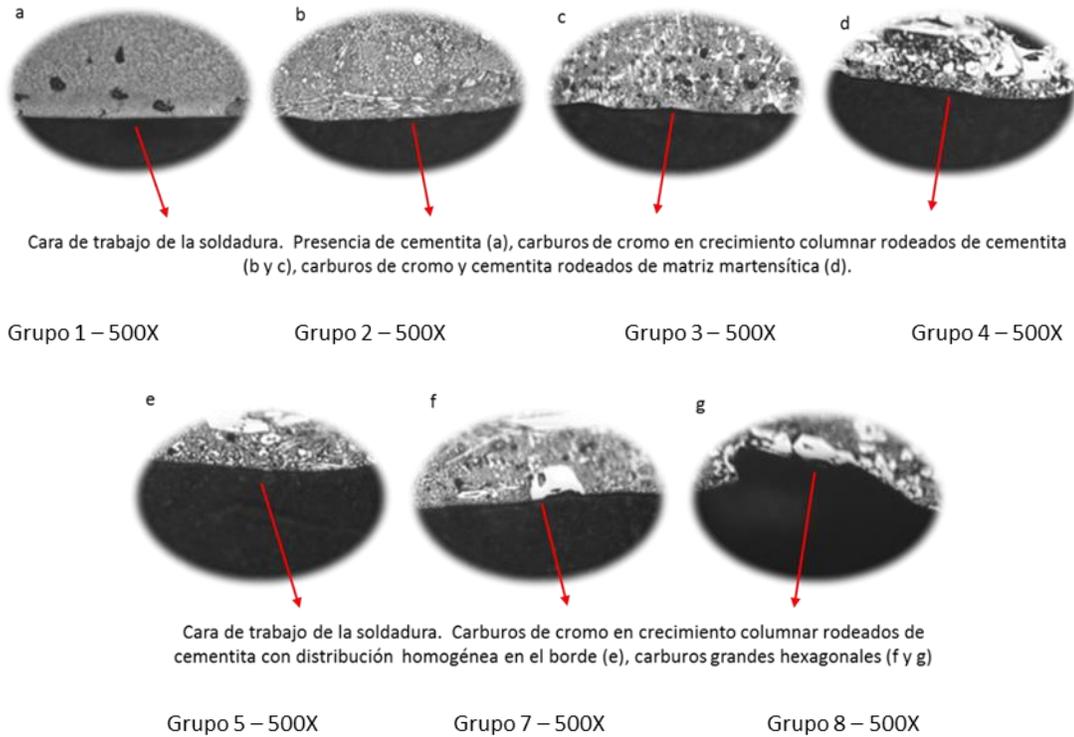


Figura 3-18. Micrografías Superficie de Trabajo de recubrimiento con soldadura



3.6 Microscopia electrónica de barrido SEM

La microscopia electrónica de barrido sobre la superficie de las probetas, nos permite evidenciar la manera como el mecanismo de desgaste se ha presentado en cada uno de los materiales

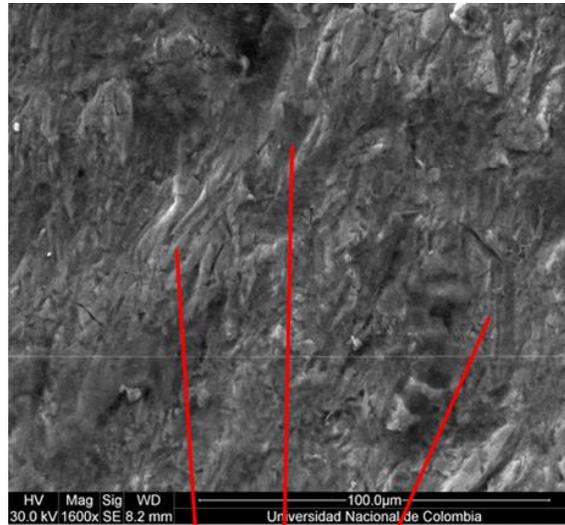
- Lámina recubierta con soldadura – Bimetálica

La Figura 3-19, Figura 3-20, Figura 3-21, Figura 3-22, Figura 3-23, Figura 3-24 y Figura 3-25 muestran la superficie de las unidades muestrales recubiertas por soldadura con aleación de carburos de cromo predominante.

En primer lugar, se pueden ver diferencias marcadas en cuanto al efecto de degradación del material para cada una de las 3 velocidades de incidencia de partícula. [26]

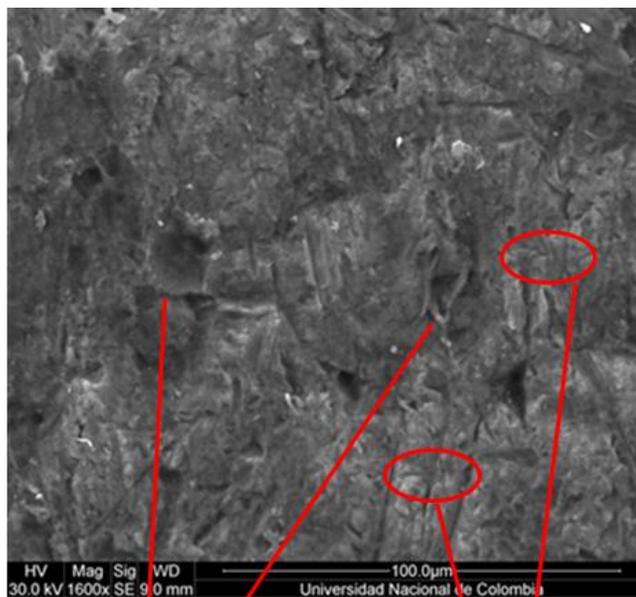
La probeta del grupo 4 está sometida a una velocidad de flujo V1 mayor que las probetas de los grupos 1,2 5 y 7 que están expuestas a un flujo con V2 y que las probetas de los grupos 3 y 8 que fueron sometidas a un flujo de erosivo con la menor velocidad V3. Fotografías complementarias se pueden observar en el Anexo H.

Figura 3-19. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 4.



Arrastre de material con deformación plástica

Figura 3-20. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 1.



Bordes alrededor de cráteres de impacto

Marcas de arado

Figura 3-21. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 2.

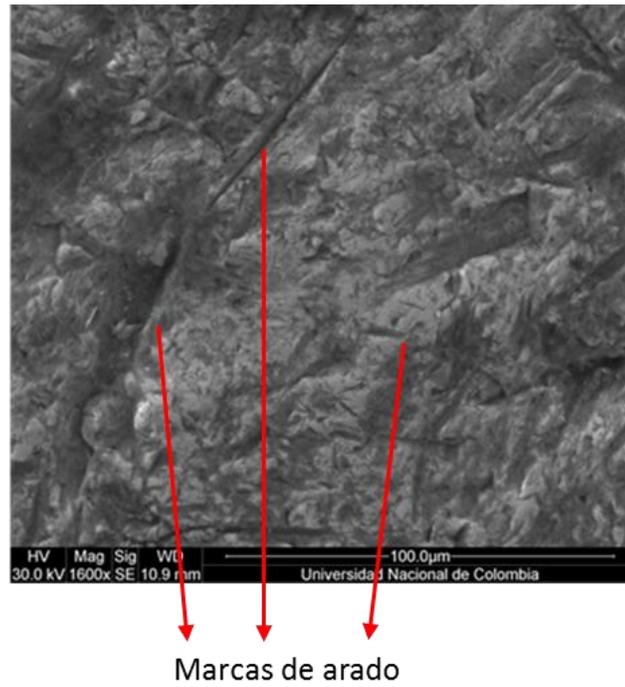


Figura 3-22. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 5.



Figura 3-23. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 7.

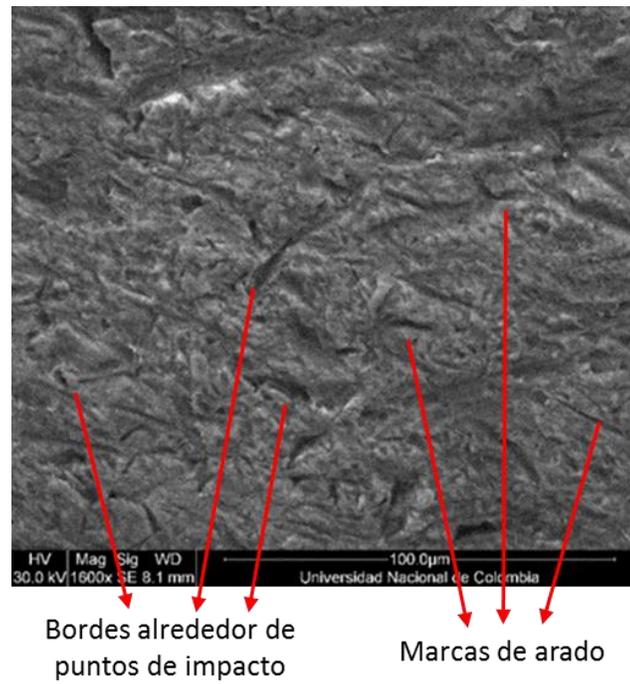


Figura 3-24. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 3.

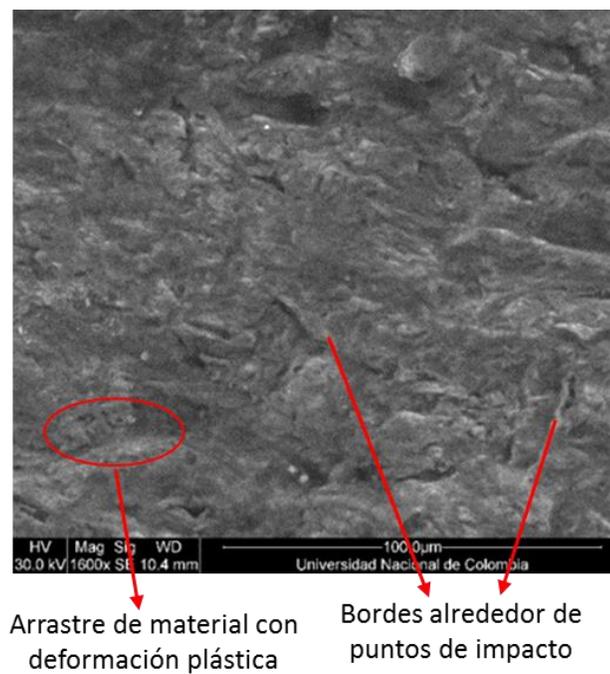


Figura 3-25. Fotografía SEM probeta, lámina recubierta grupo 8.



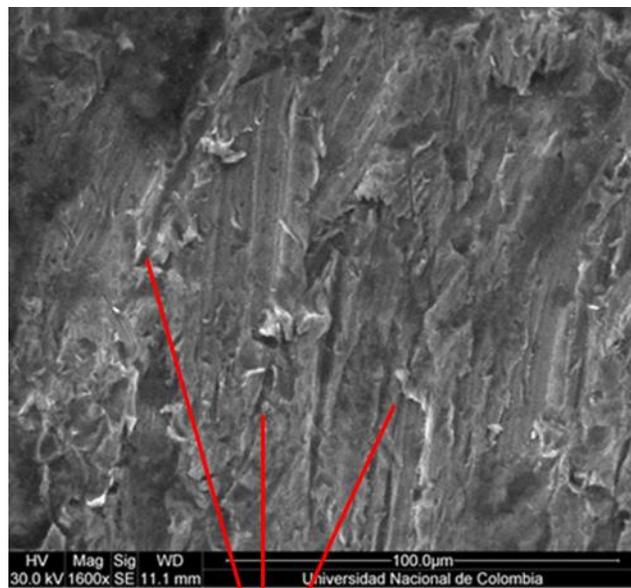
Arrastre de material con
deformación plástica

Bordes alrededor de
puntos de impacto

Las Figuras 3-26 hasta la Figura 3-32 muestran las superficies de las unidades muestrales de lámina termotratada.

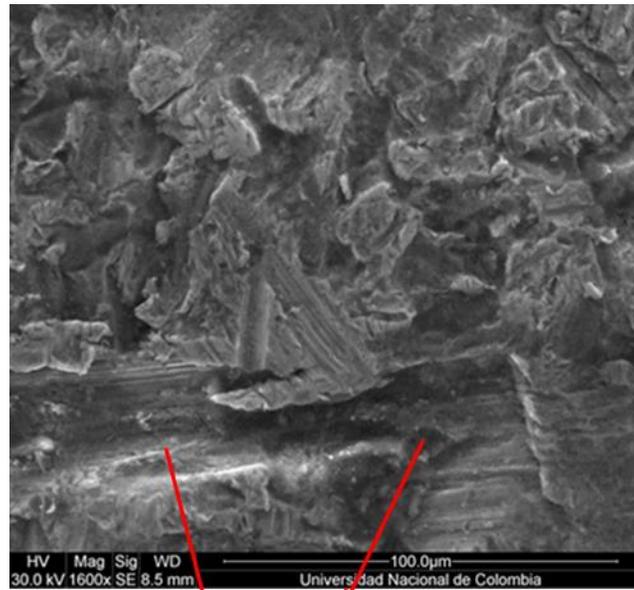
- Lámina Termotratada

Figura 3-26. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 4.



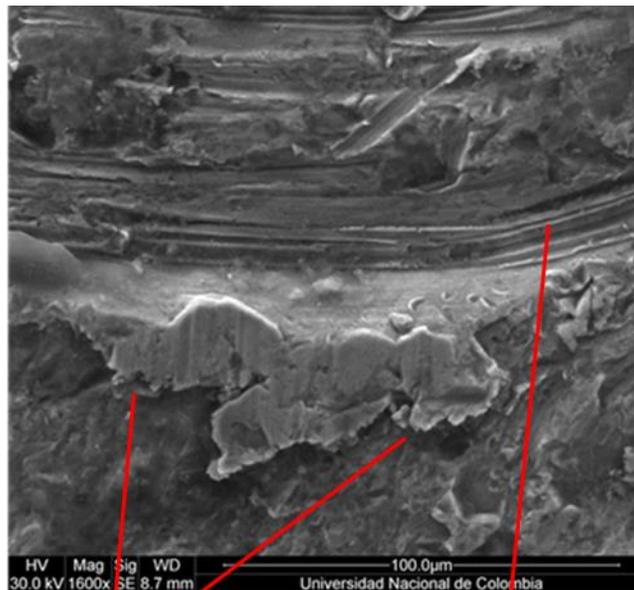
Bordes alrededor de cráteres de impacto

Figura 3-27. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 1.



Huellas de arrastre y remoción de material con deformación plástica

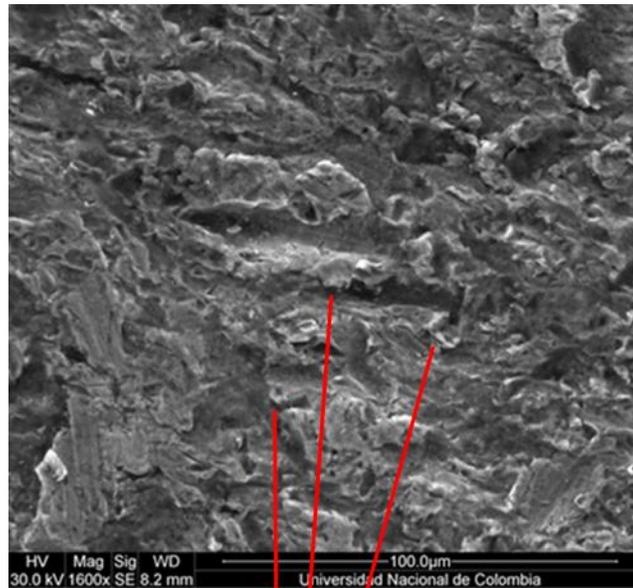
Figura 3-28. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 2.



Bordes alrededor de cráteres de impacto

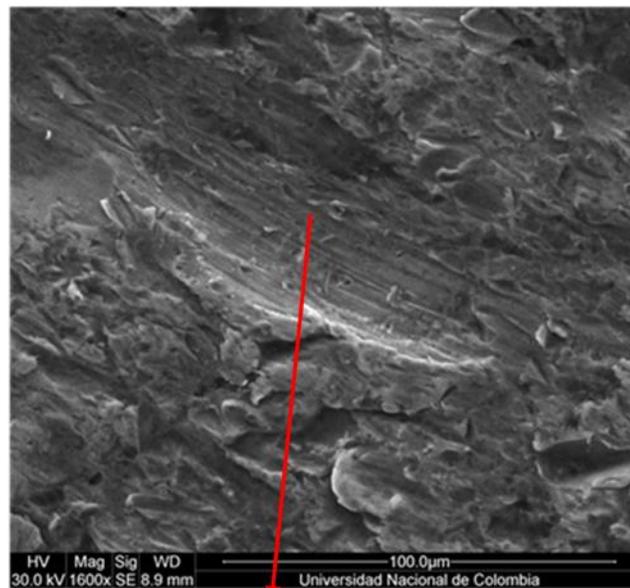
Huellas de arrastre y remoción de material con deformación plástica

Figura 3-29. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 5.



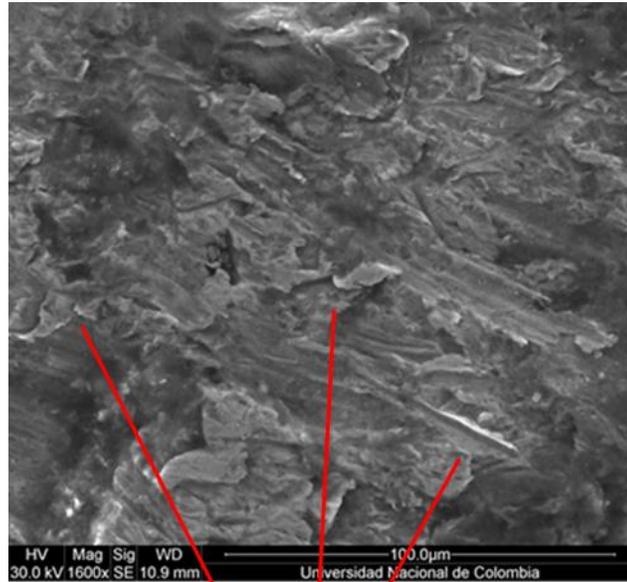
Bordes alrededor de
cráteres de impacto

Figura 3-30. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 7.



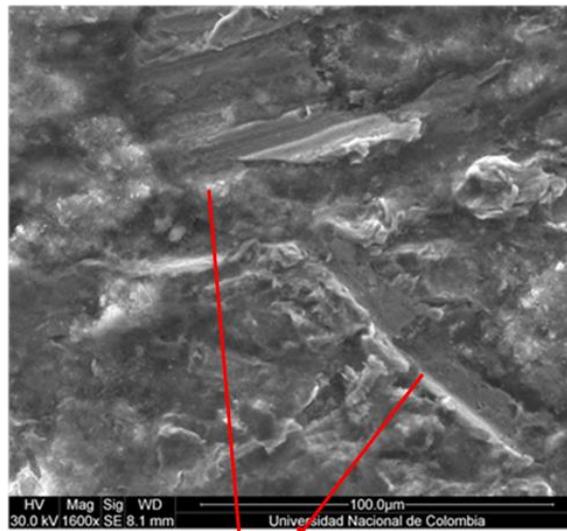
Huellas de arrastre y remoción de
material con deformación plástica

Figura 3-31. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 3.



Bordes alrededor de cráteres de impacto

Figura 3-32. Fotografía SEM probeta, lámina termotratada grupo 8.

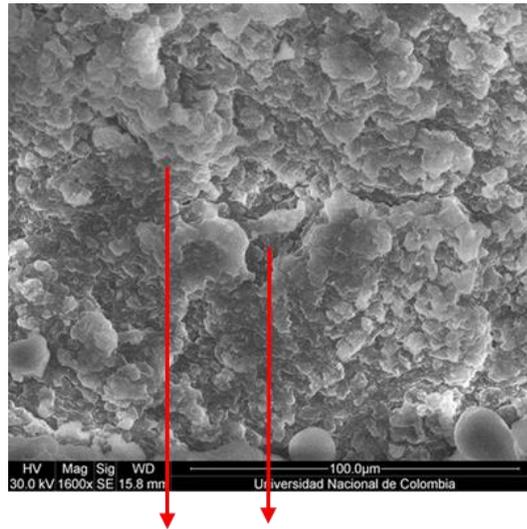


Huellas de arrastre y remoción de material con deformación plástica

- Probeta polimérica Silicona RTV

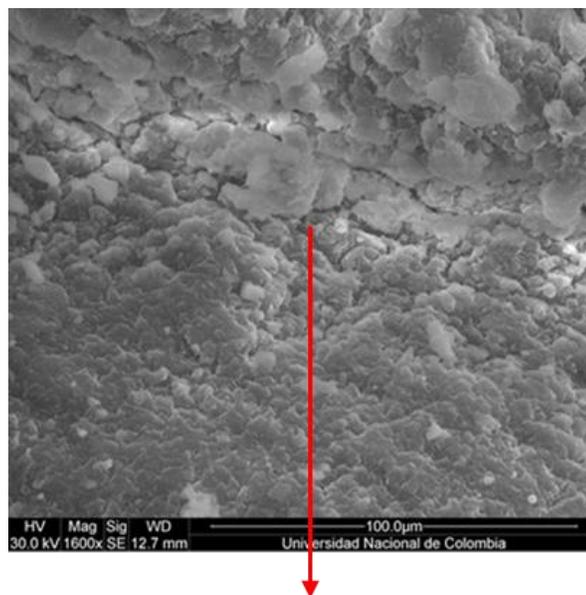
Las figuras 3-33 hasta la 3-39 muestran la superficie de las unidades muestrales recubiertas con silicona.

Figura 3-33. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 4.



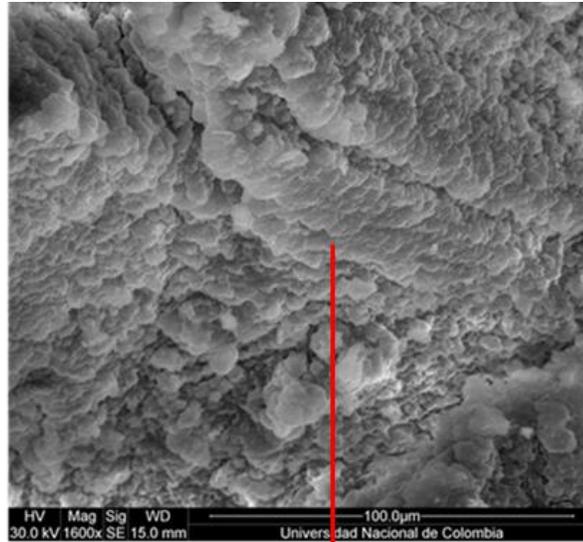
Formaciones nodulares con mínima formación de capas

Figura 3-34. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 1.



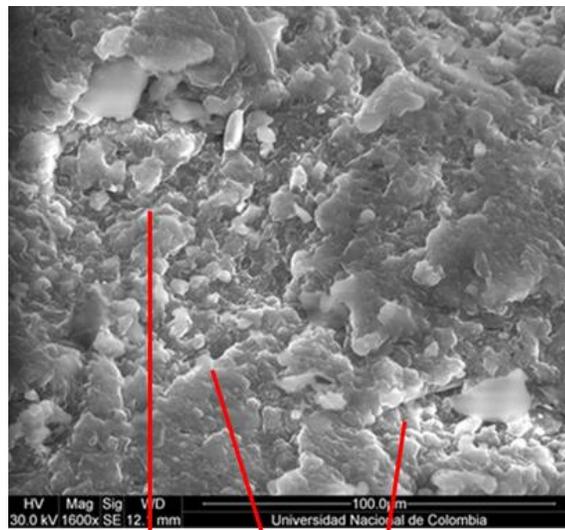
Grandes formaciones nodulares

Figura 3-35. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 2.



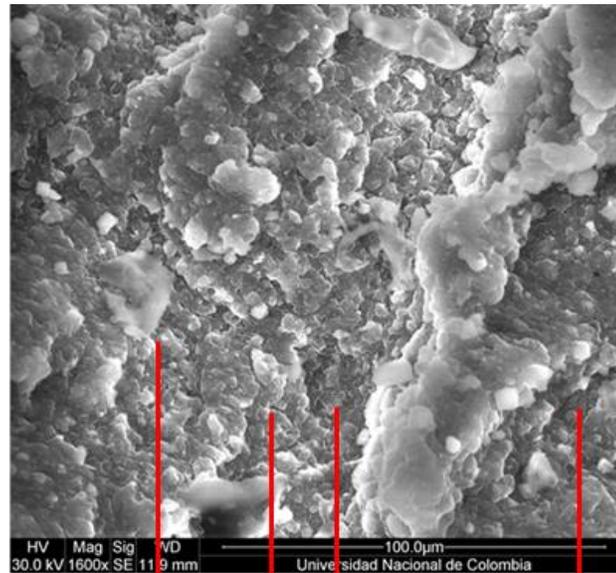
Grandes formaciones nodulares

Figura 3-36. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 5.



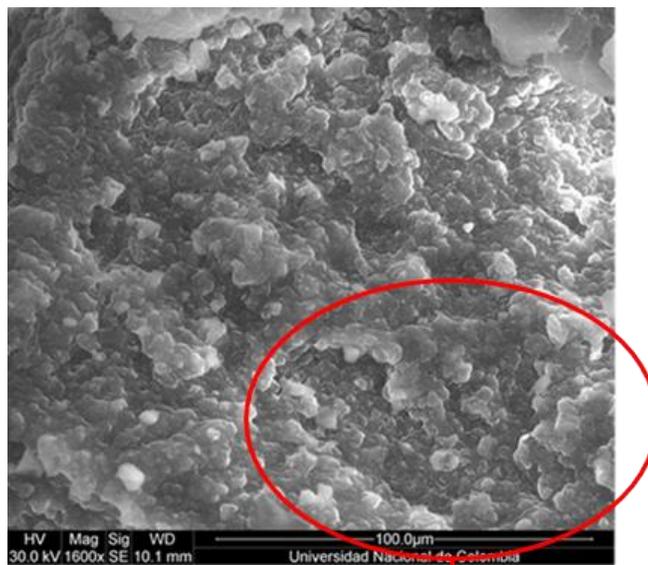
Gránulos y formación de capas

Figura 3-37. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 7.



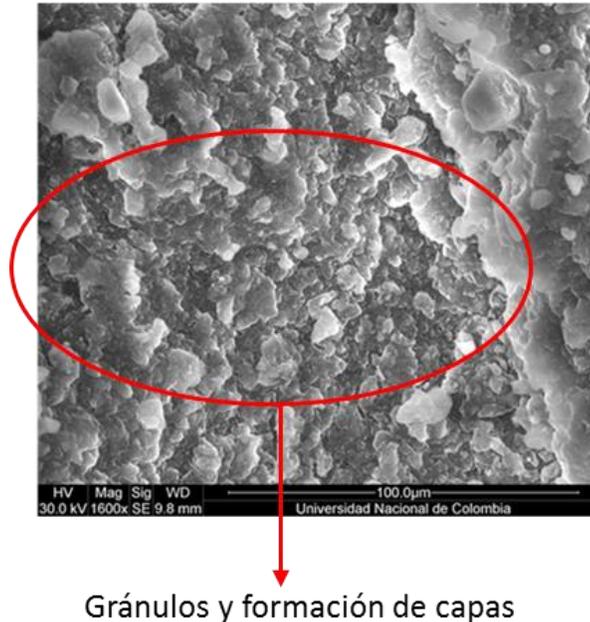
Gránulos y formación de capas

Figura 3-38. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 3.



Gránulos y formación de capas

Figura 3-39. Fotografía SEM probeta polimérica grupo 8.



3.7 Mediciones de Dureza y Microdureza

Se realizaron las mediciones de dureza correspondientes para cada uno de los materiales.

Los valores de dureza de las probetas metálicas fueron tomados en un durómetro Wilson, con indentador para escala Rockwell C (HRC) y bajo condiciones de humedad del 60% y temperatura de 17,7°C. Los resultados se aprecian en la Tabla 3-13.

Por su parte, los valores de dureza de la probeta de silicona fueron tomados en un durómetro REX, y en la escala Shore A, con unas condiciones de humedad del 65% y de temperatura de 18,6°C. Los resultados se presentan en la Tabla 3-14. Es importante anotar que se toman los valores de dureza tanto en la superficie no erosionada, la cual estaba protegida contra la chapa base, como también sobre la superficie que fue objeto de erosión.

Tabla 3-13. Mediciones dureza probetas metálicas, posterior realización del experimento. (HRC)

Lámina Recubierta con Soldadura	
Valor Medición	55
	60
	62
	58
	54
	61
	59
	60
	56
	54
DStd	2,96
Media	57,90

Lámina Termotratada	
Valor Medición	42
	42
	42
	44
	43
D Std	0,89
Media	42,60

De los cálculos de incertidumbre de las mediciones tomadas, los valores de aceptación a partir de las desviaciones estándar serán:

Lamina recubierta: 57,9 +/- 2,96 HRC

Lamina termotratada: 42,6 +/- 0,89 HRC

Material polimérico posterior a la erosión: 29,2 +/- 0,92 Shore A

Tabla 3-14. Mediciones de dureza probetas de silicona (Shore A)

Polimérica sin erosión	
Valor Medición	24
	25
	24
	25
	25
	24
	25
	25
	24
	25
DStd	0,52
Media	24,60

Polimérica Erosionada	
Valor Medición	28
	29
	30
	30
	28
	30
	29
	30
	30
	28
DStd	0,92
Media	29,20

Las mediciones de microdureza se realizaron sobre las probetas del recubrimiento por soldadura. Se midió con un Durómetro Leco M-400 y el resultado para las dos fases representativas de acuerdo con la figura 3-40 es el siguiente:

Figura 3-40. Zonas microestructurales para medición de microdureza



Fase Zona 1: Valor promedio de las diagonales, 6,37 μm

Carga aplicada: 25grf

Por tanto, la determinación de la dureza vickers será de acuerdo con la ecuación:

$$HV = 1,854 P/d^2$$

El valor para la microdureza de la fase será:

$$HV = 1,854 * \frac{0,25}{0,0000405}$$

$$HV = 1145$$

Fase Zona 2: Valor promedio de las diagonales, 18,35 μm

Carga aplicada: 75grf

Por tanto, la determinación de la dureza vickers será de acuerdo con la ecuación:

$$HV = 1,854 P/d^2$$

El valor para la microdureza de la fase será:

$$HV = 1,854 * \frac{0,075}{0,000345}$$

$$HV = 403$$

De acuerdo con esto, la fase dura es correspondiente con la dureza de carburos en este caso predominantemente de Cromo y la fase de menor dureza es correspondiente con martensita.

3.8 Espectroscopia

El análisis por espectroscopia de emisión óptica, se realizó para validar la composición química de los materiales metálicos. Para ello se realizó un corte a una de las probetas termotratadas y a una de las probetas recubiertas por soldadura que fueron seleccionadas de cada grupo y sobre ellas se realizó el análisis, los resultados se ven en la Tabla 3-15.

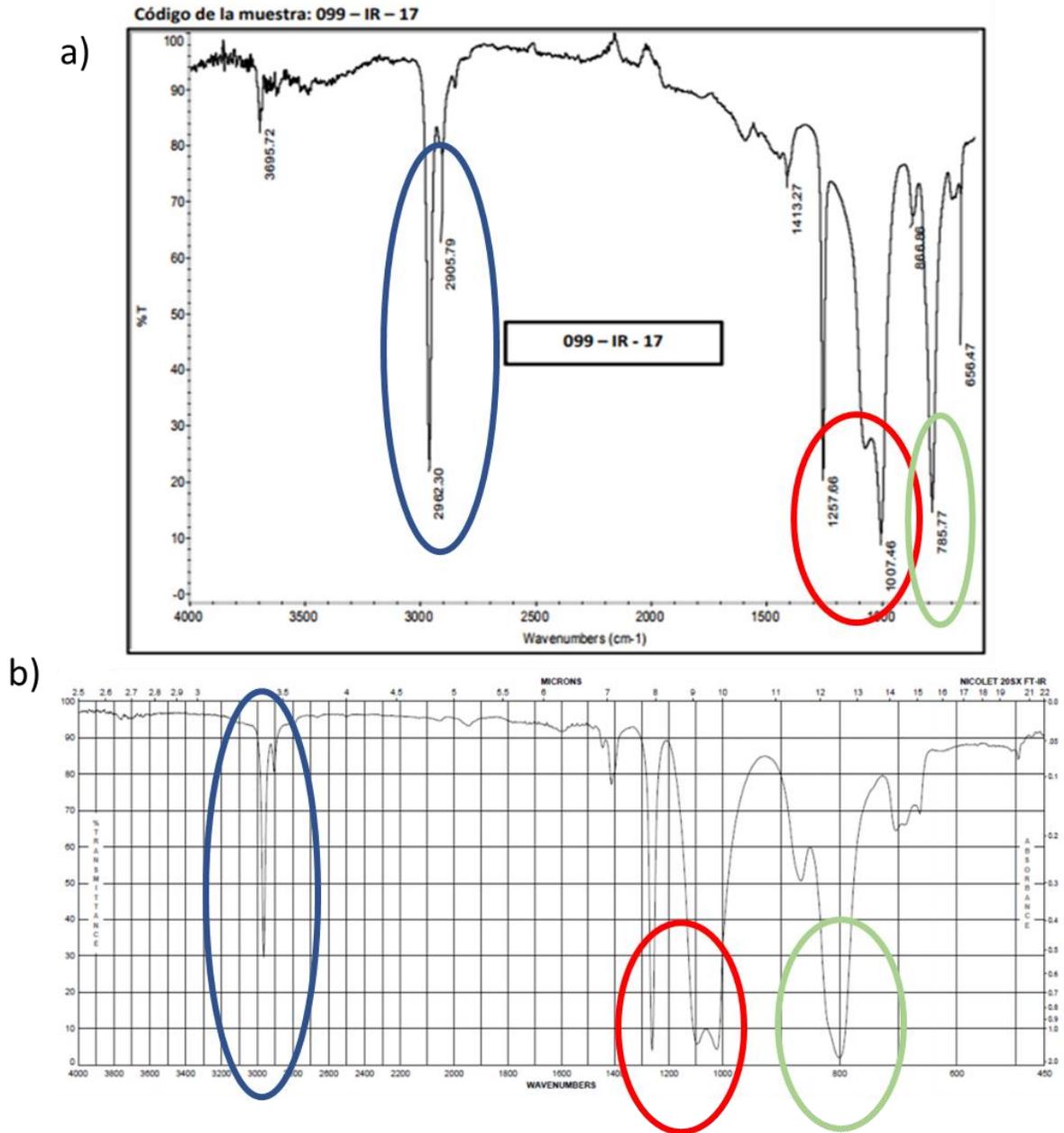
Para el caso del material polimérico, la silicona RTV, como ya se anotó anteriormente, el procedimiento de análisis de material utilizado fue la espectroscopia infrarroja y el resultado se observa en la Figura 3-41. Los códigos corresponden en su totalidad a una muestra de silicona.

El análisis espectroscópico permitió identificar que el material del recubrimiento es rico en Cromo, el cual es el principal aleante, incluso teniendo cantidades muy pequeñas de Boro y Niobio, con porcentajes inferiores a 1%, aunque sí con porcentajes representativos de Manganeso. En este contexto entonces, es preciso anotar que los carburos que se formaron son exclusivamente de Cromo.

Tabla 3-15. Resultados espectroscopia.

Metal base lámina recubierta			Análisis Soldadura de Recubrimiento			Análisis Típico Fabricante
Fe	%	99,087	Fe	%	84,306	Balance
Mn	%	0,503	Cr	%	12,498	22,3
C	%	0,199	C	%	4,95	5,24
Cu	%	0,036	Nb	%	0,012	7,11
Cr	%	0,025	B	%	0,0166	2,1
P	%	0,023	Mn	%	1,021	0,21
Ni	%	0,023	Ni	%	0,106	
Al	%	0,023	S	%	0,016	
W	%	0,021	Co	%	0,015	
Si	%	0,018	W	%	0,009	
S	%	0,014	Sn	%	0,009	
Mo	%	0,009	Al	%	0,017	
Pb	%	0,007	V	%	0,025	
Co	%	0,005	Cu	%	0,032	
Nb	%	0,003	P	%	0,001	
Sn	%	0,002	Mo	%	0,01	
V	%	0,001	Ti	%	0,009	
B	%	0,0003	Pb	%	0,024	
Ti	%	0,000	Si	%	0,606	
Mg	%	0	Mg	%	0	

Figura 3-41. Espectroscopia infrarroja para material polimérico.



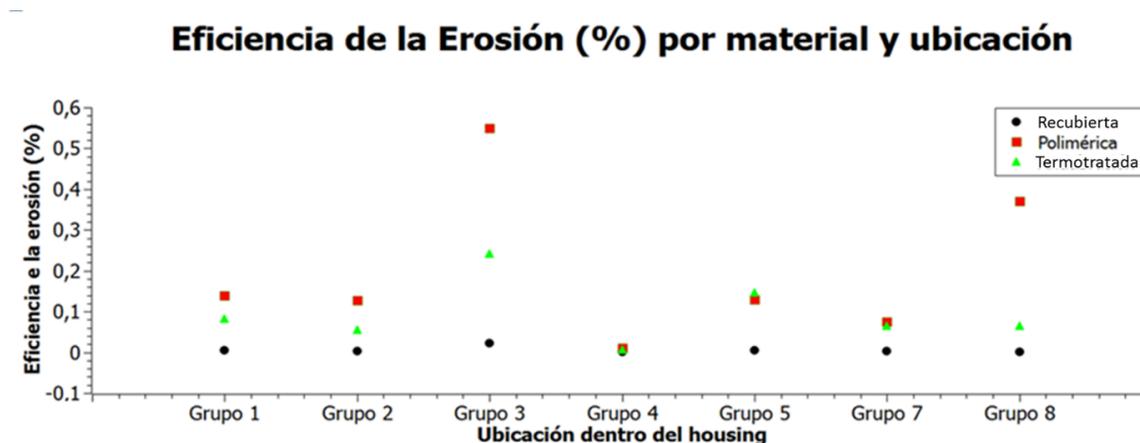
3.9 Eficiencia de la Erosión

De acuerdo con las pérdidas de peso correspondientes por cada uno de los materiales, en cada uno de los grupos y aplicando la Ecuación (1.5) obtenemos la gráfica de la Figura 3-42, en donde se puede apreciar por cada uno de los grupos el comportamiento de cada uno de los materiales teniendo en cuenta su dureza, densidad, tasa de desgaste y la correspondiente velocidad de incidencia del flujo erosivo en cada punto. Como se mencionó

en el capítulo 1, los materiales dúctiles, como los metales puros, tienen una tasa de erosión máxima, E, con ángulos de incidencia bajos (típicamente de 15 ° a 30 °), mientras que para materiales frágiles, como la cerámica, el máximo es de 90 ° o cerca de este [68].

De los resultados mostrados entonces en la figura 3-42 se concluye que el mecanismo de erosión es de tipo dúctil en todos los casos, dado que ninguno de los materiales en ninguno de los grupos tiene una eficiencia superior a 1, incluso en algunos casos como para la lámina recubierta con soldadura la eficiencia de la erosión es muy cercana a cero.

Figura 3-42. Eficiencia de la Erosión



3.10 Análisis estadístico

Desde el punto de vista estadístico, y tal como se ha explicado en uno de los capítulos de este trabajo, se debieron realizar cambios en el diseño dadas las condiciones reales de experimentación. Esto implicó básicamente que no hubo posibilidad de hacer comparaciones entre grupos a la velocidad alta, dado que después del montaje por temas de la operación de la planta debió retirarse la lámina sobre la cual se montó el experimento. Sin embargo se realizaron ANOVAS general a todos los grupos en todas las posiciones y por grupos sobre la velocidad baja y la velocidad media, así como también las debidas comparaciones propuestas.

Es importante detallar que los análisis estadísticos se realizaron sobre no sobre el peso perdido sino que se realizó sobre la información del volumen perdido teniendo como base que las densidades entre los materiales metálicos y la silicona son bastante significativas.

El primer análisis que se realizó fue el ANOVA para todos los tratamientos

3.10.1 Análisis de Varianza para todos los tratamientos.

Se quiere determinar con un nivel de significancia del 95% si hay alguna diferencia significativa entre las posiciones de los grupos, los diferentes materiales y la interacción entre ellos. Para tal fin se plantean las respectivas hipótesis nulas (H0) y alternas (H1) :

Posición de los grupos

H0: No hay diferencia significativa entre las posiciones de los grupos

H1: Hay diferencia significativa entre las posiciones de los grupos

Materiales

H0: No hay diferencia significativa entre los materiales utilizados

H1: Hay diferencia significativa entre los materiales utilizados

Interacción

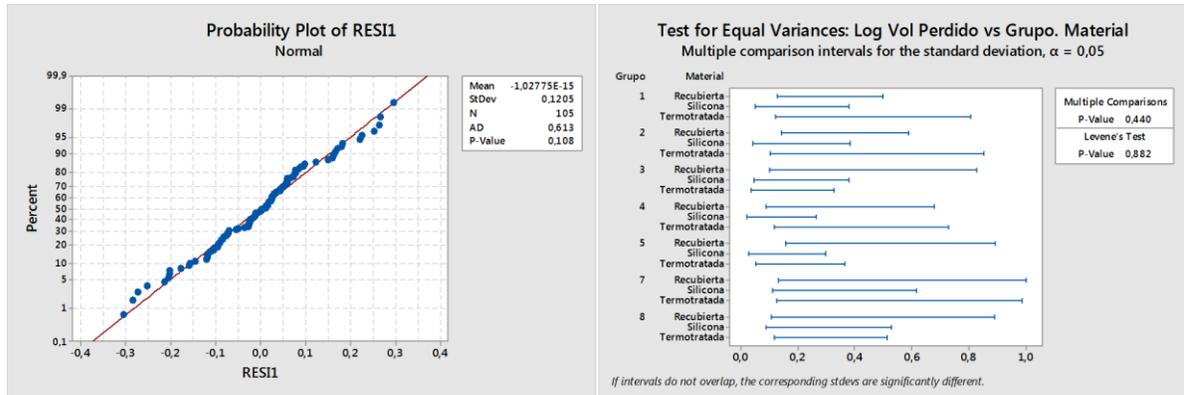
H0: No hay diferencia significativa por la interacción de las posiciones de los grupos y los diferentes materiales utilizados.

H1: Existe diferencia significativa por la interacción de las posiciones de los grupos y los diferentes materiales utilizados.

En primer lugar se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de medias. Para ello se utilizó la prueba de Anderson-Darling. Los datos originales de volumen perdido no cumplen el supuesto de normalidad por lo cual se hace un ajuste mediante la función Log10 de cada valor, cumpliendo los residuos el supuesto de normalidad con un P-Value de 0,108. De la misma manera, se verifica el supuesto de homogeneidad de medias mediante la prueba de Levene, en cuyo caso el P-value es de 0,882. La figura 3-43 muestra la distribución de los residuos para los dos casos.

Para los dos casos valores P superiores a 0,05 cumplen con un 95% de confianza dichos supuestos.

Figura 3-43 Gráficas de residuales para supuestos de normalidad y homogeneidad de medias análisis para todos los tratamientos



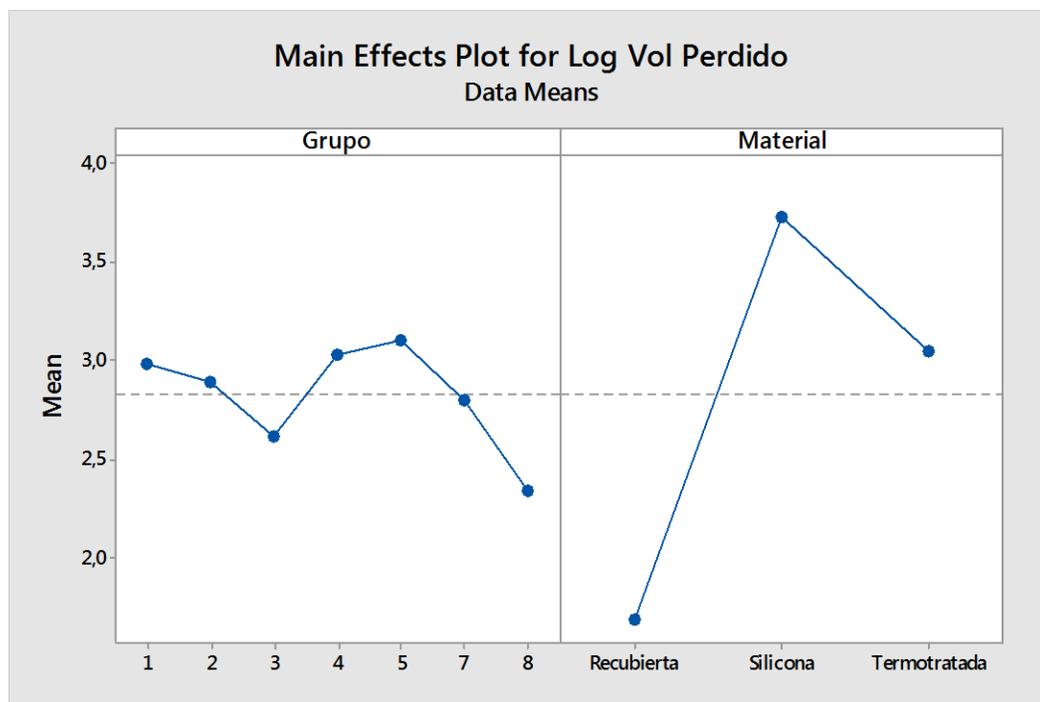
Se procede a realizar los cálculos de varianza para todos los datos mediante el software MiniTab-17, siendo los resultados los que aparecen en la tabla 3-16.

Tabla 3-16. ANOVA para todos los tratamientos

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Grupo	6	6,412	1,0686	59,40	0,000	
Material	2	74,749	37,3745	2077,54	0,000	
Grupo*Material	12	1,389	0,1157	6,43	0,000	
Error	84	1,511	0,0180			
Total	104	84,061				

A partir de estos resultados se pudo establecer que se descartan las hipótesis nulas propuestas y por su parte se aceptan las hipótesis alternas planteadas, dado que los P-Value son menores a 0,05, lo cual nos indica que hay diferencias significativas entre las posiciones de los grupos, los diferentes materiales y la interacción entre los tratamientos. Sin embargo es importante anotar y de manera notoria, que la diferencia más significativa se da por los diferentes tipos de material tal como se observa en la figura 3-44.

Figura 3-44 Gráfica de efectos principales ANOVA todos los tratamientos



Sabiendo esto, se estableció entonces si existen diferencias significativas entre los grupos y materiales a una velocidad de los gases determinada, teniendo en cuenta que los grupos 1,2,5 y 7 reciben la corriente erosiva a una velocidad media de gases y, los grupos 3 y 8 reciben la corriente erosiva a una velocidad baja. El grupo 4 se tuvo como único a la velocidad más alta de manera que no hará parte de este análisis, sin embargo si es importante mencionar que a partir de la comparación de varianzas se evidencia que su comportamiento es similar al de los grupos sometidos a los gases a velocidad media.

3.10.2 Análisis de Varianza Velocidad Baja (Grupos 3 y 8)

En principio se plantearon las respectivas hipótesis nulas y alternas a partir del cuestionamiento si existen diferencias significativas entre los efectos de los factores posicionamiento y tipo de material para una velocidad baja de los gases.

Tratamiento: Grupos (posición de grupos)

H0 : No hay efecto significativo de la posición de los grupos a la velocidad baja.

H1: Hay efecto significativo de la posición de los grupos a la velocidad baja.

Tratamiento: Tipo de Material

H0: No hay efecto significativo del tipo de material a la velocidad baja.

H1: Hay efecto significativo del tipo de material a la velocidad baja.

Interacción

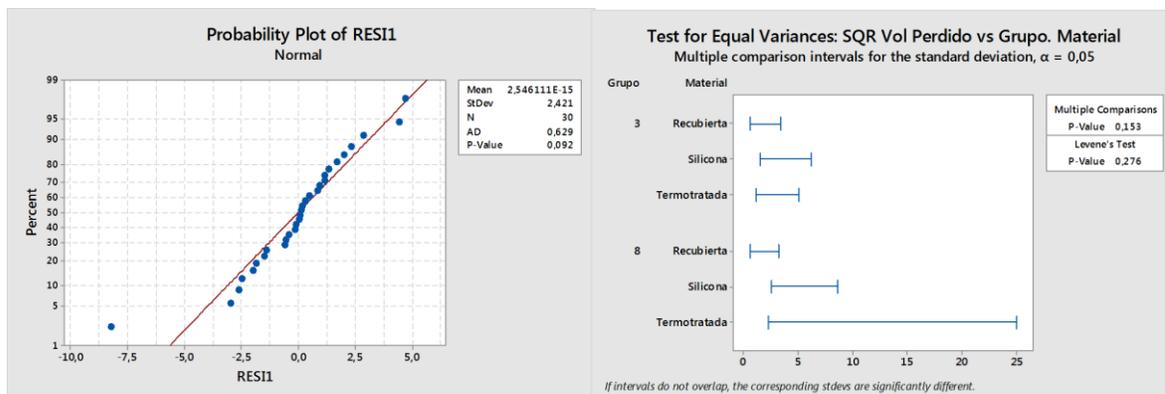
H0: No hay efecto significativo de la interacción entre la posición de los grupos y tipo de material a la velocidad baja.

H1: Hay efecto significativo de la interacción entre la posición de los grupos y tipo de material a la velocidad baja.

Para verificar estas hipótesis, en primera instancia se verifica el cumplimiento de los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de varianzas.

El supuesto de normalidad se consigue luego de hacer ajustes a los datos mediante la función de raíz cuadrada de los volúmenes perdidos. El P-Value para la prueba de Anderson-Darling es 0,092. Para el caso de homogeneidad de varianzas, la prueba de Levene arroja como resultado un P-Value de 0,276 con una significancia del 95%, cumpliendo el supuesto de homogeneidad de varianzas. La figura 3-45 permite observar gráficamente la distribución respectiva de los residuos en las dos pruebas realizadas.

Figura 3-45 Gráficas de residuales para supuestos de normalidad y homogeneidad de medias análisis para tratamientos velocidad baja

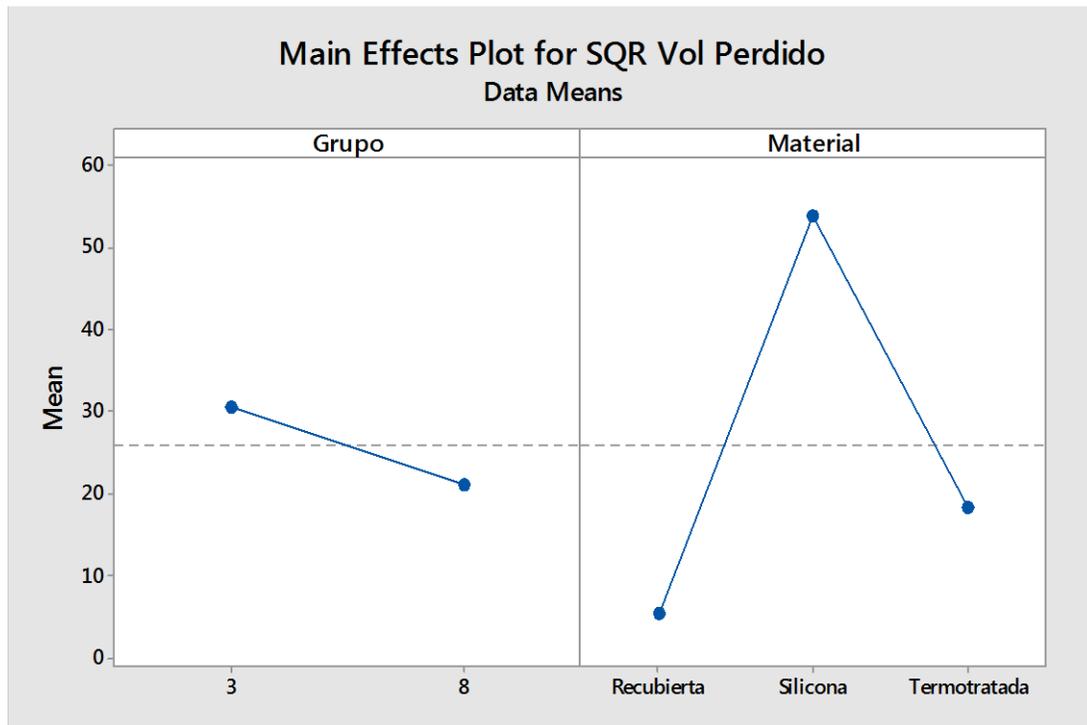


Con los supuestos ya cumplidos se procedió a ejecutar el ANOVA respectivo, siendo el resultado tal como se observa en la tabla 3-17 y la gráfica de los efectos principales se puede observar en la figura 3-46.

Tabla 3-17. ANOVA para los tratamientos a velocidad baja

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Grupo	1	667,6	667,56	94,29	0,000	
Material	2	12687,7	6343,86	896,04	0,000	
Grupo*Material	2	290,3	145,16	20,50	0,000	
Error	24	169,9	7,08			
Total	29	13815,5				

Figura 3-46 Gráfica de efectos principales ANOVA para los tratamientos a velocidad baja



A partir de los resultados del ANOVA, se puede concluir que hay diferencias leves en el volumen de material perdido entre los grupos 3 y 8 y entre materiales la diferencia más significativa está en el comportamiento de la silicona comparado con la lámina termotratada y la recubierta.

3.10.3 Análisis de Varianza Velocidad Media (Grupos 1,2,5 y 7)

En este apartado se analizó si existen diferencias significativas entre los efectos de los factores grupos y tipo de material para una velocidad media de los gases.

Para ello se determinan las hipótesis respectivas:

Tratamiento: Grupos (posición de grupos)

H0 : No hay efecto significativo de la posición de los grupos a la velocidad media.

H1: Hay efecto significativo de la posición de los grupos a la velocidad media.

Tratamiento: Tipo de Material

H0: No hay efecto significativo del tipo de material a la velocidad media.

H1: Hay efecto significativo del tipo de material a la velocidad media.

Interacción

H0: No hay efecto significativo de la interacción entre la posición de los grupos y tipo de material a la velocidad media.

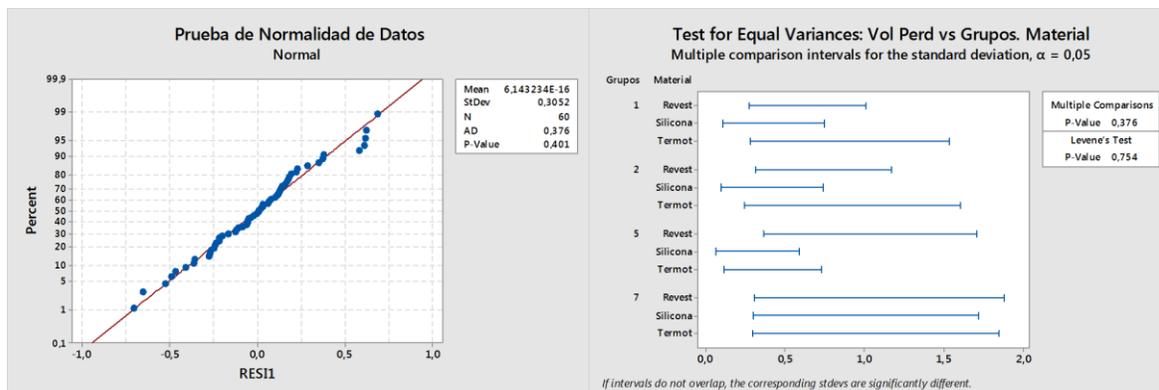
H1: Hay efecto significativo de la interacción entre la posición de los grupos y tipo de material a la velocidad media.

Para ello se realizó la prueba de normalidad mediante el estadístico de Anderson-Darling y prueba de homogeneidad de varianzas mediante el estadístico de Levene.

Después de un ajuste de datos a través de la función (ln) se consigue cumplir con el supuesto de normalidad y de homogeneidad de varianzas.

Los P-value respectivos son 0,401 y 0,754, en ambos casos superiores al nivel de significancia de la prueba $>0,05$ y la figura 3-47 ilustra gráficamente este resultado.

Figura 3-47 Gráficas de residuales para supuestos de normalidad y homogeneidad de medias análisis para tratamientos velocidad media



Cumplidos ya los supuestos, se procede entonces al análisis de varianzas y sus resultados son los que se muestran en la tabla 3-18:

Tabla 3-18. ANOVA para los tratamientos a velocidad media

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Grupos	3	3,896	1,299	11,34	0,000
Material	2	247,666	123,833	1081,57	0,000
Grupos*Material	6	1,542	0,257	2,24	0,055
Error	48	5,496	0,114		
Total	59	258,599			

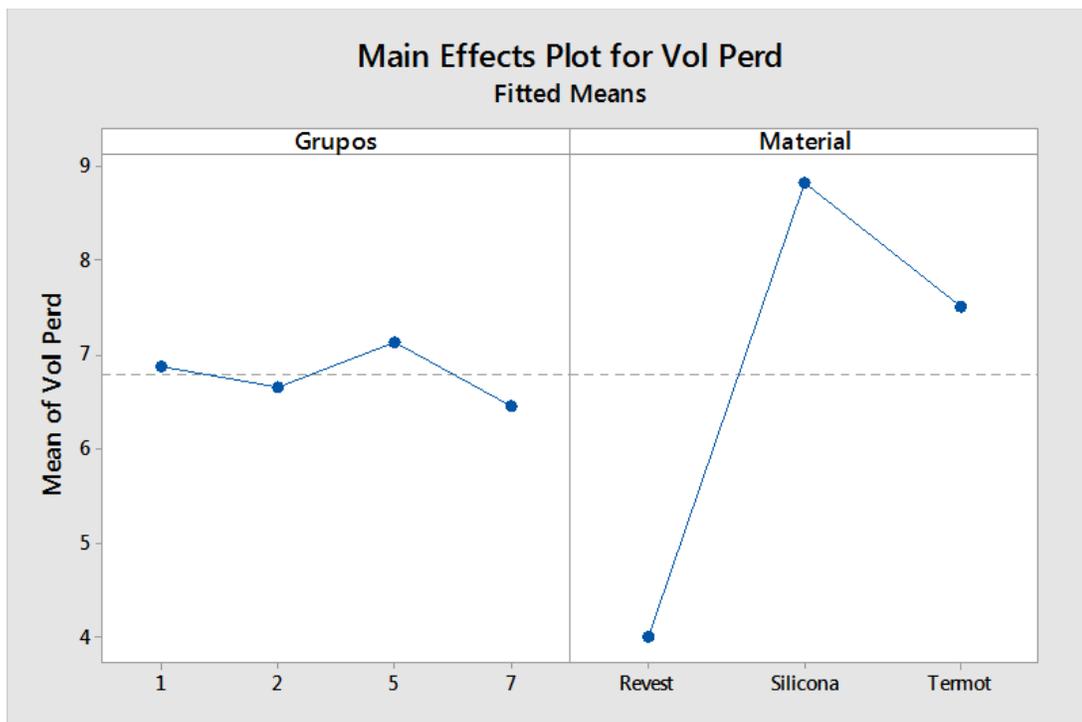
De donde podemos concluir lo siguiente:

Con un nivel de significancia del 5%, se descartan las hipótesis nulas para los efectos de el tratamiento grupos y el tratamiento materiales cuando se analizan individualmente, lo que indica que si hay diferencias significativas entre ellos, siendo lo más representativo la diferencia por efecto del tipo de material mientras que el efecto del posicionamiento de los grupos es muy leve.

Por otro lado y algo que debe considerarse relevante es que cuando se analizó la interacción entre tratamientos, se aceptó la hipótesis nula, lo cual indica que no hay diferencias significativas en los efectos de la interacción de los tratamientos a velocidades medias de los gases.

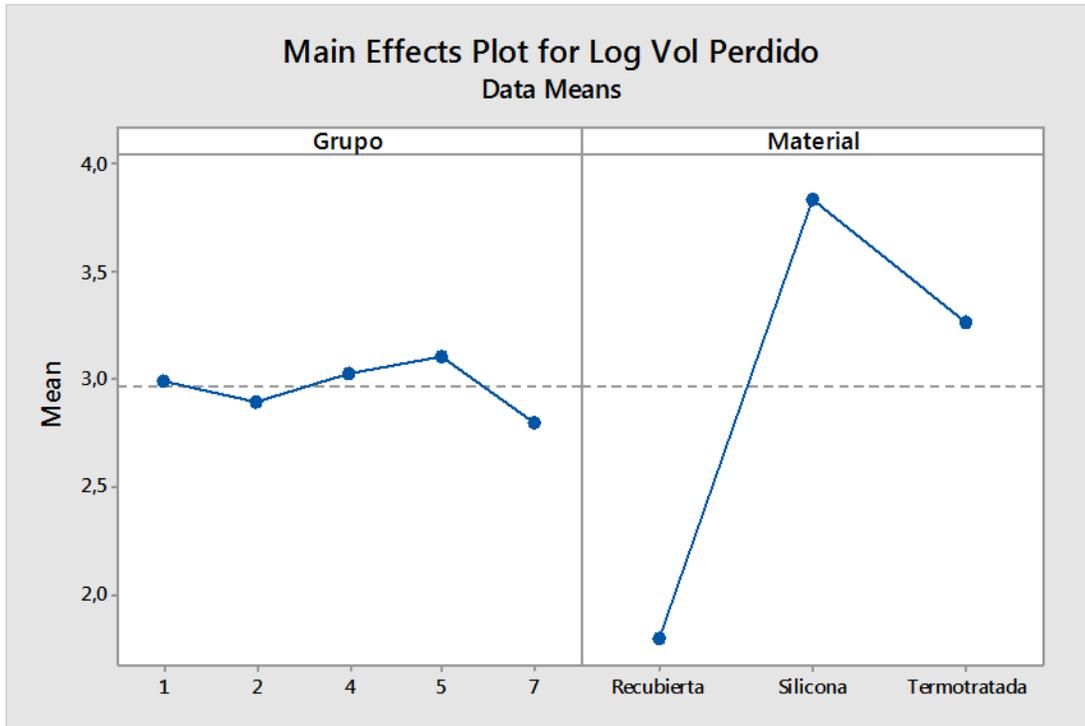
La interacción entre los tratamientos no es significativa en la respuesta. Adicionalmente, para esta velocidad de los gases, tal como se observa en la figura 3-48, el comportamiento de la lámina termotratada y la silicona es muy cercano mientras que hay una marcada diferencia entre éstas y la lámina recubierta con soldadura.

Figura 3-48 Gráfica de efectos principales ANOVA para los tratamientos a velocidad media



En términos de comparación de materiales, se puede concluir a partir de este análisis, que en todos los casos el mejor desempeño lo tiene la lámina recubierta con soldadura, habiendo una diferenciación interesante entre los grupos sometidos a velocidad media, en donde el volumen de material perdido por la silicona y por la lámina termotratada es muy superior al de la lámina recubierta, comportamiento que se puede evidenciar en la figura 3-49, incluso para el grupo 4 que está sometido a altas velocidades.

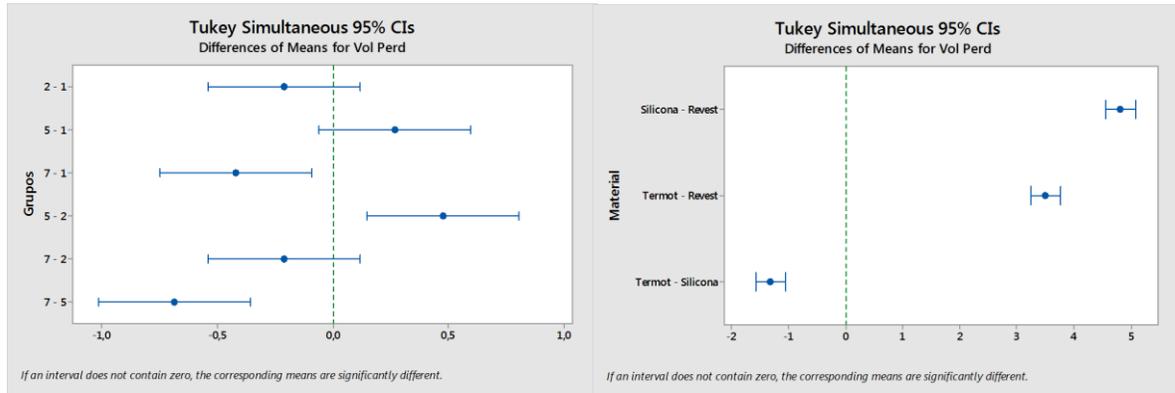
Figura 3-49 Gráfica de efectos principales ANOVA para los tratamientos a velocidad media y alta



De otro lado, en este punto es interesante señalar que para la velocidad media, (grupos 1,2,5,7) aun cuando en general la pérdida de volumen es diferente entre todos los grupos, hay algunos puntos que se salen de esta aseveración y como se aprecia en la figura 3-50 puede llegar a haber materiales ubicados específicamente en ciertas posiciones y sobre los cuales los niveles de volumen perdido pudiera llegar a decirse que no tuvieran diferencia significativa y podrían usarse de manera indistinta.

En la figura 3-50, la línea punteada corresponde al eje "0", a partir de esto cualquier intervalo que no tenga el valor "0" contenido indica que tiene diferencia significativa con cualquier otro intervalo. Así las cosas se pudo observar que puede haber la posibilidad de encontrar volúmenes de desgaste similares entre materiales de los grupos 1, 2 y 7.

Figura 3-50. Comparación gráfica entre materiales de los grupos 1, 2, 5, 7



El detalle señalado anteriormente se puede apreciar con precisión en la tabla 3-19, en donde los materiales que no comparten letra tuvieron volúmenes perdidos significativamente superiores a los que por su parte si comparten letra.

Tabla 3-19. Prueba de comparación de Tukey entre materiales grupos 1, 2, 5, 7

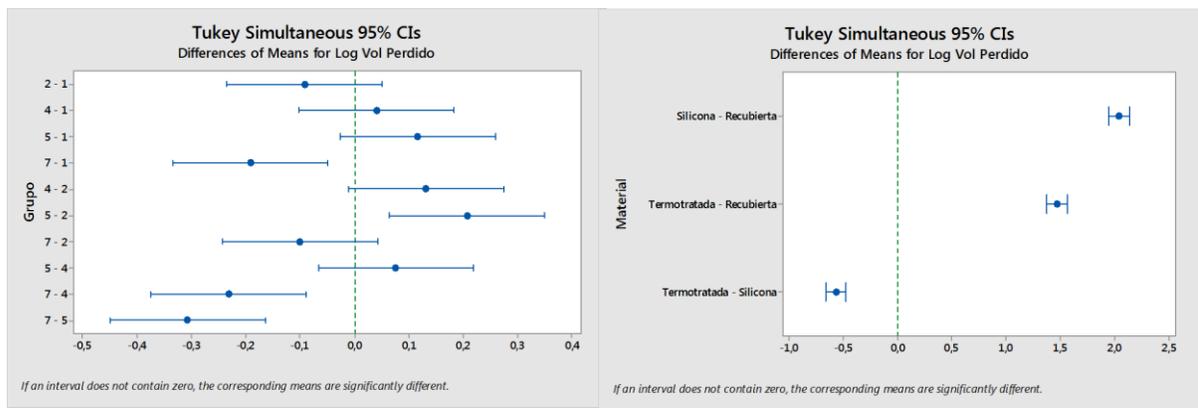
Grupos*Material	N	Mean	Grouping		
1 Silicona	5	9,04357	A		
5 Silicona	5	8,97709	A		
2 Silicona	5	8,95569	A		
7 Silicona	5	8,35598	A	B	
5 Termot	5	8,14073	B	C	
1 Termot	5	7,50823	C		D
7 Termot	5	7,28398	D		
2 Termot	5	7,12950	D		
5 Revest	5	4,32294	E		
1 Revest	5	4,08905	E		
2 Revest	5	3,92519	E		
7 Revest	5	3,73581	E		

Means that do not share a letter are significantly different.

En este caso, la silicona del grupo 7 tuvo un desgaste similar la termotratada del grupo 5, que a su vez tuvo un desgaste similar a la termotratada del grupo 1 y esta también a su vez tuvo una pérdida de volumen similar a la termotratada del grupo 1.

Este mismo análisis se realizó para las velocidades medias y altas conjuntamente, siendo el resultado el que se muestra en la figura 3-51

Figura 3-51. Comparación gráfica entre materiales de los grupos 1, 2, 5, 7 y 4



En este caso, se pudo ver que en su generalidad los materiales tienen diferencias significativas, hay ciertas similitudes ya a interior de los grupos, lo cual podemos apreciar en la tabla 3-20

La tabla 3-20 nos permitió hacer una serie de análisis muy interesantes, dado que tal como se ha expresado anteriormente el volumen perdido de las probetas recubiertas por soldadura es significativamente diferente a las de los otros dos materiales en cualquier posición (dada la posición por el grupo). Se pudo observar y recalcar también que la silicona fue la de menor desempeño, sin desconocer que no hay diferencias tan notorias, dado que incluso no hay diferencia significativa entre el volumen perdido por la silicona del grupo 7 y la lámina termotratada del grupo 1.

Tabla 3-20. Prueba de comparación de Tukey entre materiales grupos 1, 2, 5, 7 y 4

Grupo*Material	N	Mean	Grouping		
1 Silicona	5	3,92757	A		
5 Silicona	5	3,89870	A	B	
2 Silicona	5	3,88940	A	B	
4 Silicona	5	3,83512	A	B	C
7 Silicona	5	3,60378		B	C
5 Termotratada	5	3,53548		C	D
1 Termotratada	5	3,26078		D	E
4 Termotratada	5	3,26003		D	E
7 Termotratada	5	3,16339			E
2 Termotratada	5	3,09630			E
4 Recubierta	5	1,98939			F
5 Recubierta	5	1,87743			F G
1 Recubierta	5	1,77585			F G
2 Recubierta	5	1,70469			F G
7 Recubierta	5	1,62244			G

Para la velocidad media, cada material se comportó prácticamente de manera similar en todos os grupos. En el caso de la silicona hubo diferencia entre el volumen perdido entre los grupos 1 y 7; por su parte la lámina termotratada tuvo diferencia significativa entre el volumen perdido en el grupo 5 y el grupo 2 y finalmente la lámina recubierta tuvo diferencia significativa entre el volumen perdido entre los grupos 4 y 7.

Por su parte cuando las velocidades son bajas, los volúmenes perdidos por la lámina termotratada son más cercanos a la recubierta por soldadura siendo una alternativa de posible utilización siempre y cuando el balance costo beneficio sea lo suficientemente atractivo. En todos los casos la silicona fue la de menor desempeño aun cuando habría que evaluarse su utilización posible en las zonas de menor velocidad de los gases dado que precisamente en esas zonas la dificultad de manipulación y montaje de las otras láminas son de alto riesgo en temas de seguridad Industrial para el personal que realiza estas actividades.

De lo anterior se pudo determinar que existe una diferencia significativa entre la distribución del volumen perdido de los tres materiales entre sí; en ninguno de los casos la pérdida de peso fue similar entre materiales, siendo lo más consecuente al haber visto los diversos mecanismos de desgaste de cada uno de los materiales.

Por su parte, hay diferencia significativa en el comportamiento del desgaste entre las diferentes velocidades más no a la misma velocidad, consistente con lo analizado acerca de la influencia de la velocidad en el desarrollo y predominancia de los mecanismos de desgaste.

Se pudo concluir del análisis de los materiales en cada uno de los grupos, que existe una diferencia significativa entre la distribución del volumen perdido de los tres materiales entre sí; esto soportado por el ANOVA principal Figura ZZB, en donde todos los valores de P en los grupos analizados son menores que $P < 0,05$ es decir, en ninguno de los casos el volumen perdido de material es similar entre materiales, lo cual corrobora lo manifestado por la gráfica de tasa de desgaste y sería lo más consecuente al analizar los diversos mecanismos de desgaste de cada uno de los materiales.

En cuanto a la lámina recubierta, hay posibilidad que el desgaste sea muy estable para todos los grupos dentro de la cámara, es decir, en cualquier posición (grupo) en el cual se ubiquen probetas ó se haga protección superficial mediante este material, la pérdida de volumen será similar.

Para las probetas de silicona, su comportamiento tiende a ser similar entre los grupos 2, 4, 5 y 7. Esto implicaría que si teóricamente los grupos están colocados en posiciones diferentes y sometidos a velocidades diferentes, pudiera ser que en la práctica esto no suceda así y las condiciones de ataque de flujo sean muy similares.

Finalmente, se puede inferir a partir del análisis por cada velocidad experimentada que no hay diferencia significativa por el volumen por efecto de la interacción entre los tratamientos que fueron expuestos a partículas con una velocidad media, los grupos 1, 2, 5 y 7 ($P = 0,055$).

4. Análisis de resultados

4.1 Mecanismos de desgaste

Se pudo evidenciar que las que sufrieron menor eliminación de material fueron las ubicadas en los grupos 3 y 8, a partir de la tasa de erosión significativamente menor para estos grupos, y como consecuencia de la menor velocidad de impacto en dicha posición según se observa en el perfil de velocidades y alineado con lo descrito en la literatura [12] en donde se sustenta que en la medida que se incrementa ó disminuye la velocidad de impacto incluso a cualquier ángulo de incidencia, la tasa de desgaste varía directamente proporcional y esto debido a que la energía de impacto es mayor ó menor respectivamente, bien sea esta perpendicular ú oblicua.

En términos generales, para todos los materiales el mecanismo de desgaste predominante fue dúctil, esto es microarado con deformación plástica y posterior pérdida de material, evidenciado a través de las imágenes SEM y soportado por la gráfica de eficiencia de erosión Figura 3-42 del capítulo 3, que en todos los casos es menor que 1 [8], siendo incluso la eficiencia de la erosión casi imperceptible para el material recubierto con soldadura, lo cual indica que la baja tasa de desgaste es ocasionada por la rayadura que puedan ocasionar las partículas más duras del flujo de erosivo que son las de sílice y que en proporción son pocas con respecto al volumen total de partículas erosivas.

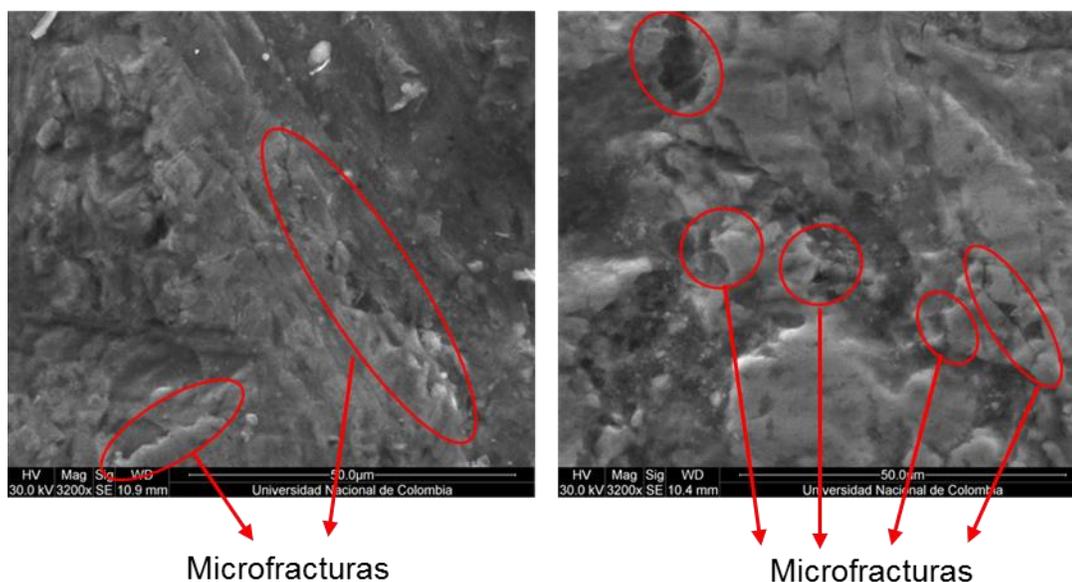
El material se expuso a diferentes tipos de partículas de erosivo y en diferentes proporciones. La mayor fracción volumétrica de partículas erosivas fueron Clinker, con el 69% del volumen, caliza con el 18% y un 8% entre puzolana y escoria del alto horno. Lo valores correspondientes para las durezas se pueden apreciar en la tabla 3-11 El último de los materiales que forman parte de la mezcla de flujo de erosivo es el yeso, el cual aporta un 5% en la mezcla de materiales al interior de la cámara de molienda.

Para que una partícula de erosivo indente plásticamente a un objetivo, su dureza debe ser al menos un 20% mayor que la de éste. Para el caso de las partículas de Clinker, la razón entre la dureza de éste y la de los carburos de Cr del recubrimiento está alrededor de 0,3, para el caso de la sílice y la escoria alrededor de 0,75 mientras que para la alúmina superiores [26].

Partiendo de ello entonces, el Clinker no puede indentar ni provocar la fractura de los carburos primarios en aleaciones de hierro de alto cromo con ángulos de impacto entre los 60° y los 90° y con ángulos menores de incidencia no alcanza a hacer remoción de material de la matriz, antes bien, se fractura debido al impacto y a su baja dureza con respecto al recubrimiento teniendo una contribución muy baja en la tasa desgaste tal como lo referencia Tilly y Sage [51].

Para el caso de las otras partículas de erosivas presentes en el flujo, tales como la sílice ó la escoria, con durezas intermedias entre la matriz y los carburos, y la alúmina, con durezas superiores a la de los carburos, a un ángulo de incidencia normal, tienen la posibilidad de indentar y causar gran cantidad de fracturas como se muestra en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Fotografía SEM grupo 2 y grupo 3.



4.1.1 Materiales metálicos

Al observar las imágenes en el estereoscopio se puede apreciar la afectación sobre las diversas superficies. En primer lugar al analizar las muestras de lámina recubierta independiente de los grupos, se evidencian señales de arado ó rayaduras en todos los grupos pero también la presencia de cráteres sobre la superficie principalmente en los grupos

3 y 8 lo cual pudiera ser consistente con el ángulo de incidencia del flujo de gases que si bien es de régimen turbulento a la salida de la tobera, partículas pudieran proyectarse directamente sobre estos grupos en particular ya que son los únicos grupos que tienen línea directa con la salida de la tobera, con ángulos de incidencia oblicuos cercanos a los 45°; de darse esta posibilidad, el impacto provocaría la fractura frágil de los carburos circundantes a la superficie y su consecuente remoción consistente con lo manifestado por Gant y Gee [31], quienes pudieron asegurar que para materiales metálicos con microestructura compuesta por carburos, ángulos de impacto normales provocan alta microfisuración y mínima remoción, mientras que para ángulos oblicuos alrededor de los 45° la remoción es mayor y el efecto de microfisuración subsuperficial es bajo.

Teniendo en cuenta esto y las proporciones volumétricas de partículas erosivas especificadas anteriormente, se podría afirmar que el material de recubrimiento ha sido sometido a todos los abrasivos mencionados, siendo la mayor fracción de éstos el Clinker, de menor dureza que los carburos de Cr que conforman la capa de recubrimiento y de ahí las muy bajas tasas de desgaste sobre éstos, pero no dejando de ser afectados los otros materiales y por las demás partículas erosivas presentes en el flujo, sílice y cuarzo libre presentes en la puzolana y la escoria y en cantidades muy bajas en la caliza.

El microarado definitivamente se presenta por la dureza del material erosivo. Aun cuando la dureza del material de recubrimiento es muy alta, en promedio alrededor de los 57HRC, hay partículas de sílice que pueden penetrar dependiendo del ángulo de incidencia y la velocidad de impacto. Al observar estas manifestaciones predominantes de rayaduras superficiales por encima de socavaciones ó fisuración superficial, y contrastado todo ello con la eficiencia de la erosión, se puede afirmar que el mecanismo de desgaste es de tipo dúctil, en donde antes que haber pérdida de material por impacto, hay una deformación plástica previa que es incipiente en las probetas de lámina recubierta con soldadura [8] [36].

En cuanto a las láminas termotratadas el efecto de las rayadura ó microarado es mucho más notorio, hay más huellas por impacto debido también a la naturaleza de los abrasivos y a la menor dureza del material (42HRC) con respecto a la lámina recubierta, por lo cual se deja penetrar con mayor facilidad. Las huellas sugieren considerable deformación plástica cuya acumulación finaliza con la pérdida de material por fatiga tal como lo menciona Stachowiak et al [13] en sus observaciones, trayendo como consecuencia un incremento en la tasa de

desgaste, superior a la de la lámina recubierta tal como se aprecia en la Figura 3-3 del capítulo 3.

Como se ha anotado, posterior a la deformación plástica, se generan unos rebordes alrededor de la rayadura ó la indentación, y un efecto de borde tendrá lugar posteriormente con la final fragmentación de la superficie.

El grupo 8 tiene una particularidad y ésta tiene que ver con la baja tasa de erosión para el material termotratado. Como ya se ha podido establecer anteriormente la velocidad del flujo de erosivo, el ángulo de incidencia y la dureza son los tres factores preponderantes en la cantidad de erosión sobre la superficie, para el caso del grupo 8 es evidente que el ángulo de incidencia es clave para que se de este comportamiento ya que el flujo de erosivo que pasa por este punto se torna casi paralelo, de manera que a pesar de tener un efecto erosivo en sí mismo las componentes de esfuerzo tanto paralelas como perpendiculares por causa de la velocidad (que por cierto es muy baja) no tendrán mayor incidencia sobre la superficie, se disminuirá el efecto de rayado equiparando el efecto erosivo sobre el material al que sucede sobre la superficies de las probetas con Recubrimiento duro.

Este fenómeno se evidencia igualmente en la Figura 3-3 del capítulo3, en donde se puede observar una tasa de desgaste similar para los materiales recubiertos por soldadura y termotratados ubicados en el Grupo 8, que principalmente ha sido causado por el cuarzo libre (sílice presente en la puzolana), la escoria por sí misma y la alúmina (presente en el Clinker). Este es un hallazgo muy interesante, y complementario al reportado por Aptekar y Kosel [37] quienes indican que para materiales recubiertos con soldadura un alto volumen de carburos cerca de la superficie, tiende a mejorar la deformación plástica en la matriz, lo que conduce a la rápida eliminación de las partículas de carburo, implicando esto un incremento en la tasa de erosión.

A partir de lo anterior, para condiciones de erosión a 90°, no hay ventaja al utilizar material recubierto con soldadura de alta aleación, sobre recubrimientos de baja aleación.

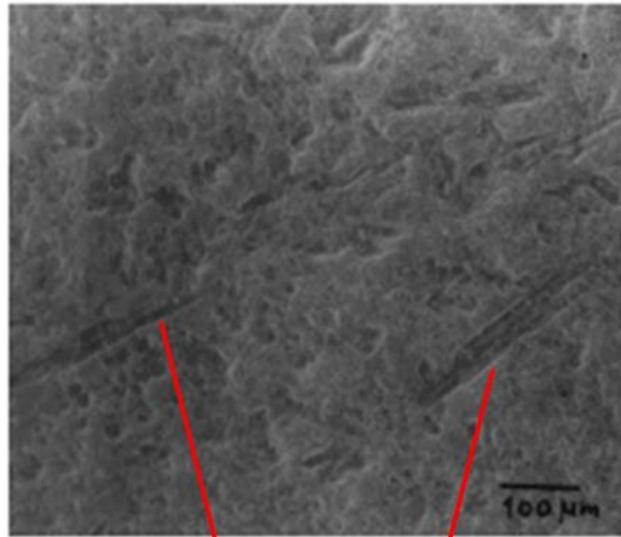
Sin embargo, en el caso de esta investigación, y teniendo en cuenta las micrografías de las muestras recubiertas con soldadura, las superficies de las capas de recubrimiento en su mayoría tienen carburos pequeños y uniformemente distribuidos, salvo en algunos casos excepcionales, además que no hay mayor evidencia de impacto normal predominante en

ninguno de las posiciones en las cuales se instalaron los grupos de experimentación, por lo tanto la tasa de erosión de las unidades experimentales recubiertas con soldadura en bastante baja.

Las fotografías tomadas en el estereoscopio permitieron ver fallas características sobre las superficies, rayaduras en los dos materiales e incluso pérdidas de material en zonas muy localizadas sobre el material recubierto con soldadura, lo cual aparentemente indica mecanismos de desgaste diferentes sobre las superficies de los materiales metálicos, sin embargo las fotografías de SEM nos corroboraron que el mecanismo predominante en los dos tipos de láminas metálicas es similar aun cuando es de mayor dimensión sobre las termotratadas pues la deformación plástica es más severa dado que la penetración de las partículas abrasivas fue superior.

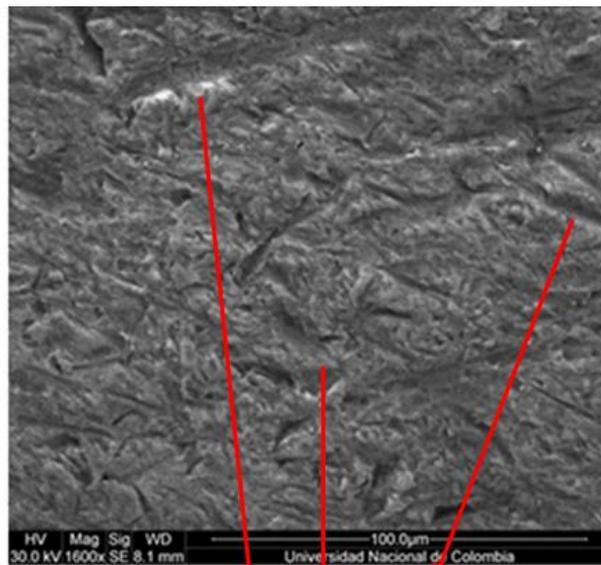
Debido a la naturaleza del flujo, de tipo turbulento, los ángulos de impacto sobre el objetivo son indeterminados, de manera que se pudo observar pérdida de material en todas direcciones tal como se puede apreciar en las imágenes obtenidas mediante SEM; tal como está descrito en trabajos previos por Sapate y RamaRao [26] al ser el Clinker el mayor volumen de partículas erosivas, y su dureza relativamente menor a la de la puzolana, y consecuentemente a la de los carburos de Cromo del Recubrimiento duro, el mecanismo predominante tiende a ser remoción de material mediante la formación de viruta, no hay marcada y directa fractura de los gránulos de carburos sino por el contrario arrastre de material, esto no debido a la indentación sobre éstos sino directamente sobre la matriz, que al ser removida desprotege los bordes de los carburos ahora sí con la consiguiente microfisuración y posterior microfractura; esto trae como consecuencia bordes redondeados en las partículas de carburo, esto puede verse en la Figura 4-2 y Figura 4-3 de manera comparativa entre el trabajo de Sapate y el resultado de este estudio.

Figura 4-2. Fotografía SEM de una aleación erosionada Cr23%. [26]



Remoción de material
por arrastre

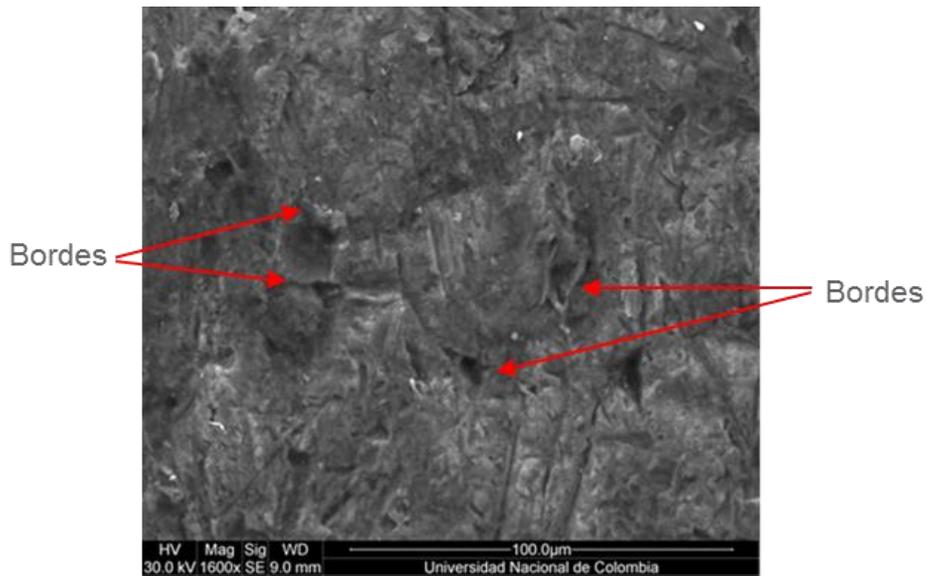
Figura 4-3. Fotografía SEM probeta lámina recubierta grupo 7 a 1200X.



Remoción de material
por arrastre

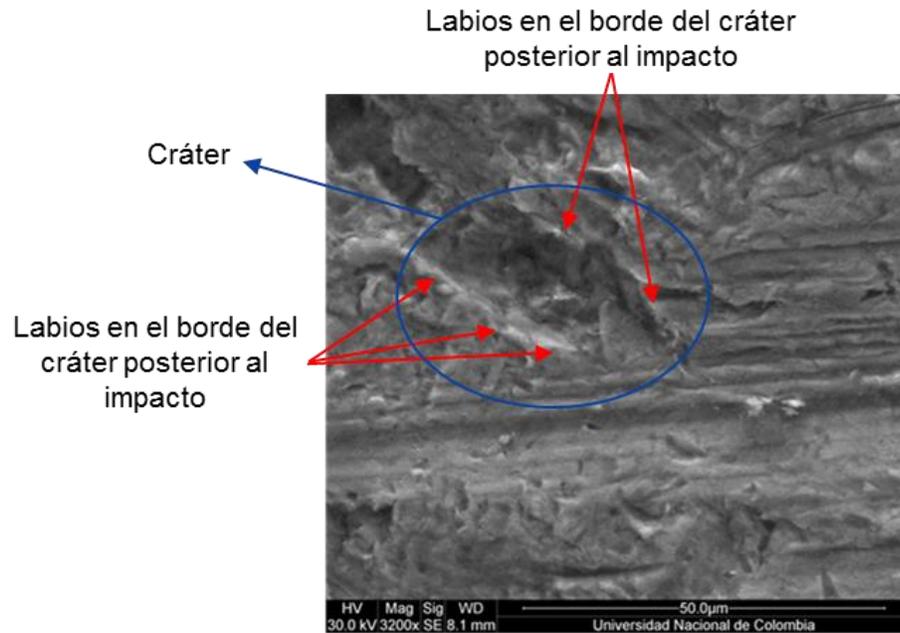
En resumen, el mecanismo de desgaste para los materiales metálicos analizados puede resumirse a partir de una carga de impacto que es suficientemente alta, dependiendo de la dureza de los materiales indenta y/o raya y desliza, por tanto se genera un desplazamiento de material con formación de bordes y posterior formación de viruta tal como se puede apreciar en algunos puntos de la Figuras 4-4 y Figura 4-5.

Figura 4-4. Fotografía SEM probeta lámina recubierta grupo 1.



Este fenómeno es similar a lo que evidenciaron Matthews et al [52]; se pudieron ver flancos cuyos bordes tienen forma de coronas, lo cual tiende a ser una mezcla de las fases presentes, principalmente influenciada por la cantidad de carburos. En la medida que la partícula erosiva penetró la superficie los carburos son forzados a moverse lateralmente, a causa de fracturas frágiles subsuperficiales

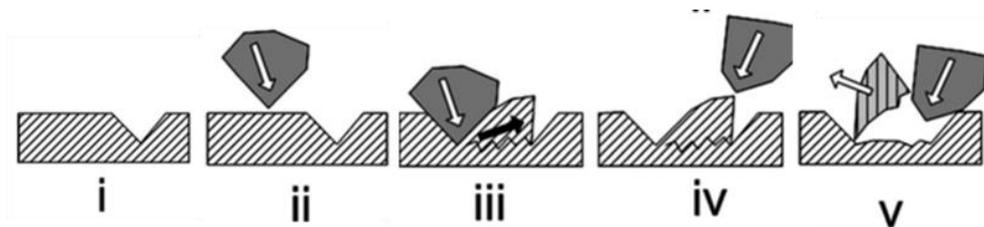
Figura 4-5. Fotografía SEM probeta lámina termotratada grupo 7.



Sin embargo, en la medida que las partículas de erosivo penetran, más material es forzado hacia afuera, dada una deformación plástica de la matriz y aun cuando los flancos se mantienen unidos mecánicamente a la superficie, la acción de ciclos de fatiga sobre el material microfisurado subsuperficialmente sumado al adelgazamiento de las laminillas que se forman por el repujado del material hacia los bordes de la indentación finalmente general el desprendimiento de material.

El proceso para el caso de las partículas de erosivo más duras, esquemáticamente fue descrito por Mathews et al [52] en la Figura 4-6.

Figura 4-6. Representación esquemática de erosión presentada por partículas erosivas duras [52].



El impacto inicial genera una indentación de varias micras de profundidad y microfisuración subsuperficial. Un impacto posterior cercano genera un patrón similar, de modo que impactos posteriores llevan a la fractura completa formando viruta de material de dimensiones comparables a la profundidad de la hendidura erosiva.

A partir de los ensayos metalográficos, se puede tener una confirmación de todo lo anterior. En primer lugar, y como era de esperarse, el Recubrimiento es una soldadura base Fe-Cr-C, fundición de hierro aleada con alto Cromo, cuya microestructura está compuesta principalmente por Carburos de Cromo del tipo M_7C_3 [53][54] dentro de una matriz martensítica. Si bien hay zonas en donde los carburos son de gran tamaño circundados por la matriz como se observa en la figura 4-7 (a), la estructura predominante es ledeburítica y la cual se aprecia en la figura 4-7 (b y c) en donde hay cementita con carburos de cromo aislados o pequeños carburos de cromo hexagonales circundado todo por la matriz martensítica.

Figura 4-7. Microestructuras de recubrimiento Fe-Cr-C. a 2000X

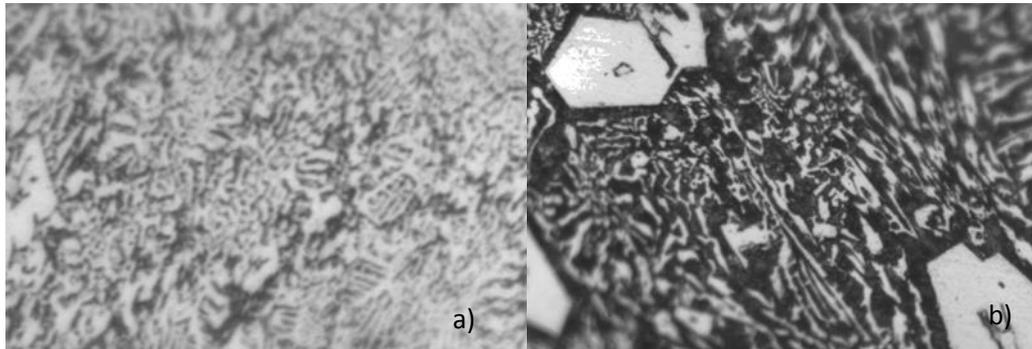


Un hallazgo interesante de este trabajo es la heterogeneidad de la microestructura de la soldadura de Recubrimiento. Si bien en todos los casos se pueden evidenciar los carburos de cromo correspondientes a la composición química revelada por el ensayo espectrométrico, la distribución tal como se observa en la figura 4-8 para diferentes probetas tomadas a partir de la misma lámina es totalmente diferente.

Esto definitivamente es ocasionado por la poca rigurosidad de los parámetros de la interfase líquido/sólido, las entropías de fusión y las fracciones de volumen de las fases constituyentes [55].

Figura 4-8. Microestructura Recubrimiento Fe-C-Cr. 2000X

a) morfología de fase tipo dendrítico. b) Morfología de fase tipo hexagonal.



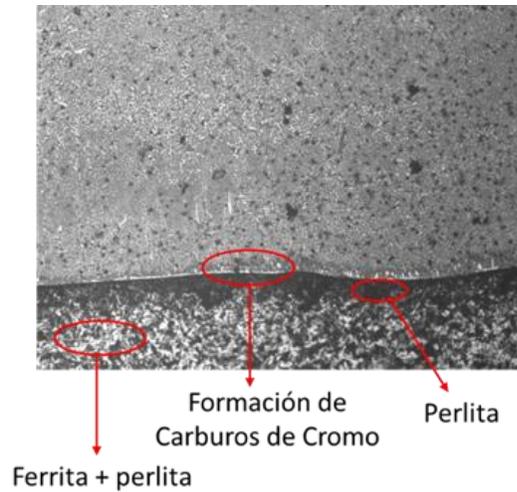
Cuando la superficie de la interfase sólido/líquido a escala atómica es rugosa, la fase sólida puede asumir una morfología dendrítica, mientras que si la superficie de la interfase es mayormente lisa, la fase de solidificación producirá en consecuencia carburos con forma poligonal [56], lo cual puede apreciarse claramente en la Figura 4-8a y 4-8b.

Desde el punto de vista del análisis de las microestructuras en fases duras, se puede decir que hay ciertos fenómenos particulares que además de los anteriormente expuestos requieren ser detallados a partir de los resultados obtenidos.

En primer lugar y como puede apreciarse en la figura 4-9, a partir del material base se presenta una difusión del carbono presente en la perlita hacia la capa dura para formar una franja de martensita con algunos carburos sobre el límite de fusión entre los dos materiales, esto ayudado por el gradiente de temperatura que se presenta en la zona afectada, lo cual posibilita la disminución de la tensión superficial entre los constituyentes de las fases permitiendo el movimiento de átomos y la formación de los carburos a partir del Cromo y del carbono.

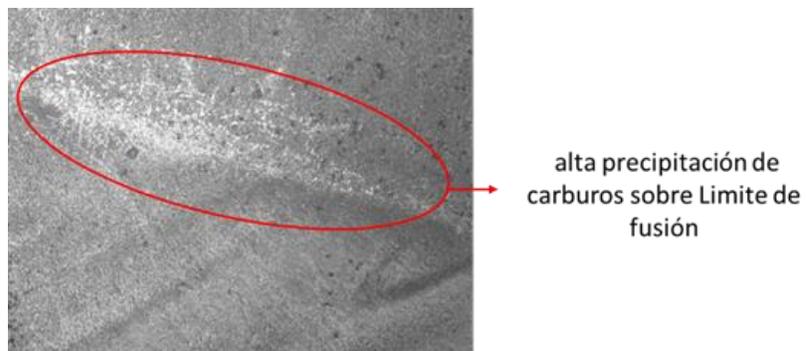
Este proceso obedece al efecto de convección de Marangoni [94] En la medida que la temperatura de la zona es menor, la formación de carburos disminuye.

Figura 4-9. Interfase entre material base y recubrimiento duro. 500X



De otro lado, la capa de recubrimiento está conformada por entre 1 y 2 pases de soldadura, de modo que hay un fenómeno similar al descrito anteriormente entre pases, debido a la afectación por la temperatura tal como se ve en la figura 4-10. Este fenómeno además de lo explicado anteriormente también puede estar fuertemente influenciado por segregación de elementos químicos a partir de las reacciones que se dan en los límites de fusión de la unión bimetálica.

Figura 4-10. Formación de Carburos sobre límites de fusión de cordones de soldadura. 500X.



En la aplicación de cordones sucesivos también es propicio mencionar que otro efecto muy importante es el revenido que se obtiene a partir del cordón superior ó consecutivo sobre el cordón previo, dado que hay un cambio microestructural notable pues ayuda a homogeneizar la estructura inicial.

En la figura 4-11 se aprecia el contraste entre dos cordones contiguos, mientras que en la figura 4-12 se puede ver una zona con distribución de carburos homogénea situada en el centro del cordón y una zona de acumulación de carburos hacia la superficie de trabajo de la lámina.

Figura 4-11. Microestructura de límite de fusión entre cordones. 800X.

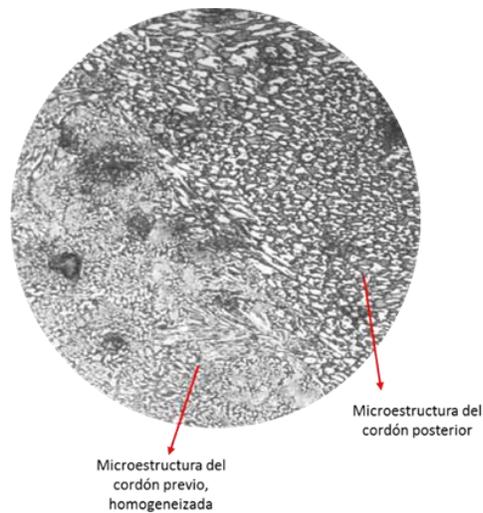
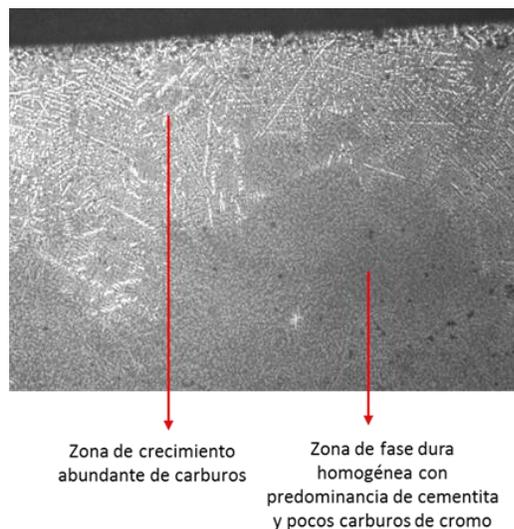


Figura 4-12. Micrografía transversal del cordón de revestimiento. 500X.



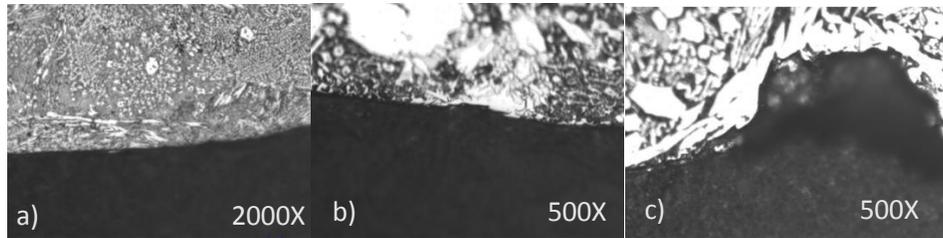
Se identifica la zona central con una microestructura cementítica homogénea y la superficie de trabajo con carburos de cromo en crecimiento dendrítico.

En cuanto al mecanismo de desgaste predominante el análisis debe tomar en consideración que al ser una deposición de soldadura mediante la acumulación de cordones de soldadura sobre un material base con diferentes propiedades, el proceso de enfriamiento en sí mismo ocasiona microfisuración transversal a la dirección de los cordones de soldadura por las cargas termomecánicas intrínsecas del proceso de solidificación. El mayor ó menor espesor de la chapa de material base se convierte directamente en una gran restricción con la generación posterior de esfuerzos de tensión residuales en el momento de la contracción dentro del proceso normal de solidificación [53]. Las zonas con este tipo de fisuras previas por supuesto son un paso adelante y una condición que favorece la pérdida de material al momento de iniciar el proceso de erosión pues ya requerirá solamente de impactos sucesivos para que la remoción de material se presente.

De otro lado, la dureza de los carburos de cromo presentes en la microestructura son propensos a la rotura. Si bien son muy duros y no permiten su indentación, dependiendo su orientación, el impacto ocasionado por los esfuerzos perpendiculares u oblicuos si puede provocar la fractura inmediata para aquellos que son perpendiculares a la superficie y sobresalen por fuera de ella ó una microfisuración severa con posterior remoción, para aquellos que están rodeados en su totalidad de la matriz martensítica, que va a proteger hasta que por fatiga ó por ablandamiento permitirá extracción de los granos de carburo. Este fenómeno es ampliamente explicado por Badisch et al [57] y es totalmente correspondiente con lo evidenciado en esta investigación.

En la Figura 4-13 se puede apreciar el proceso de pérdida de material en la superficie de las chapas de 3 diferentes probetas. Si bien el mecanismo es similar, la cantidad de pérdida de material es diferente debido a la ya explicada heterogeneidad de la microestructura. En cuanto de la micrografía de la Figura 4-13a, el borde tiene una microestructura con carburos finos uniformemente distribuidos y paralelos a la superficie, por tanto un borde sin socavaciones.

Figura 4-13. Microestructura de borde, Recubrimiento Fe-C-Cr.

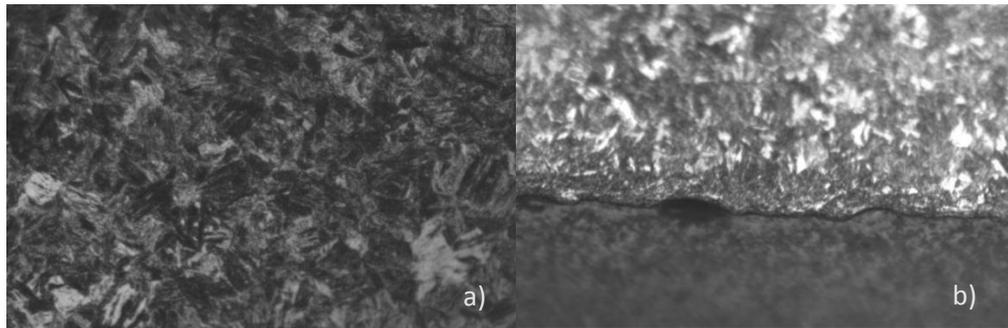


Para el caso de la micrografía en la Figura 4-13b se evidencia concentración puntual de carburos en una zona muy definida, lo cual como se observa ha empezado a remover material del centro del carbura hacia su contorno.

Finalmente, la micrografía en la Figura 4-13c reafirma el mecanismo de desgaste, en la medida que sobre la superficie se denota gran cantidad de carburos en su extensión, lo cual ha ocasionado remoción de una gran zona de material. Sin embargo, y reforzando el cuidado que se debe tener sobre los parámetros de la deposición de la soldadura es importante mencionar que la micrografía de la izquierda y de la derecha pertenecen a la misma probeta.

Por su parte, el análisis metalográfico para el caso de las unidades muestrales termotradas, Figura 4-14, denota como era de esperarse una fase martensítica, sin embargo hay una considerable proporción de martensita blanca, la cual tiene una característica frágil preponderante, siendo ésta quien actúe como motor de la pérdida de material, sumado a la deformación plástica acumulada con posterior desprendimiento de material por fatiga luego de varios ciclos de impacto.

Figura 4-14. Micrografías probeta lámina termotratada. 500X. a) al interior del material y b) de la superficie de trabajo.



La formación de martensita blanca es fomentada por la presencia de silicio y aluminio en la aleación, aseveración confirmada por el análisis espectrográfico del material. En primer lugar el aluminio incrementa las fallas en el apilamiento de la austenita y por tanto dificultará la transformación en martensita durante el proceso de enfriamiento y por su parte el silicio acelera la velocidad de enfriamiento y de allí la solidificación en fase martensítica no transformada completamente [58].

En la Figura 4-14b se puede ver la superficie de desgaste, en donde podemos evidenciar el mecanismo de desgaste predominante que ya se mencionó con anterioridad y que está caracterizado por gran deformación plástica previa a la pérdida de material, pero también se puede apreciar una pequeña zona en la cual ha habido una pérdida de material mayor y localizada, que puede estar relacionada con la presencia de martensita blanca quebradiza y frágil. Si bien el fenómeno se presenta, en un muy bajo porcentaje, la microestructura en todos los casos es muy homogénea y por consiguiente las propiedades son uniformemente distribuidas. También es importante anotar que los granos de martensita son relativamente gruesos, no muy alargados y en consecuencia tiene una muy buena dureza y por tanto su característica antidesgaste tiene un muy buen desempeño en la mayoría de aplicaciones.

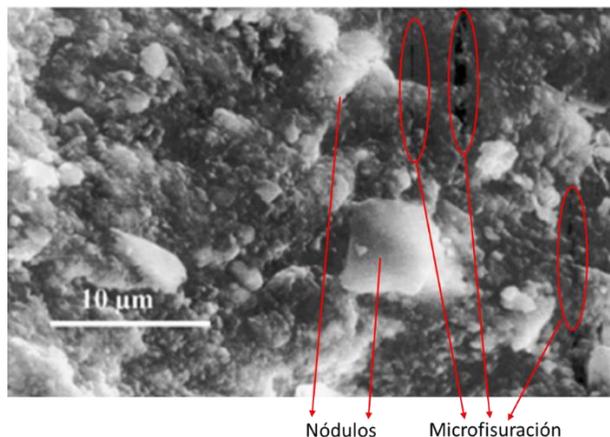
4.1.2 Silicona

En todos los casos, para el material polimérico se observan fisuras con formas de olas, dichas marcas están relacionadas con una dirección de flujo perpendicular predominante y de hecho nos permiten ver claramente dicha predominancia aun cuando hay un régimen turbulento a la salida de la tobera.

La olas se presentan cuando hay ángulos de incidencia mayormente oblicuos, el flujo sigue impactando en dicha dirección haciendo que las partículas penetren cada vez más el material haciendo las fisuras más profundas e interconectándolas entre sí, al punto de vencer la resistencia del material y producir la rotura y pérdida de material a través de este mecanismo, similar a lo descrito por Barkoula y Kocsis [8] luego de sus observaciones relacionadas con la influencia de los parámetros de las partículas erosivas y su respuesta en procesos de desgaste de polímeros.

Por su parte, en el caso del material polimérico, al observar mediante análisis SEM, se puede evidenciar que como se aprecia en la Figura 3-34 y 3-35 del capítulo 3, en grupos como el 1 y el 2 se ha formado una capa nodular y con baja porosidad aparente entre secciones circundantes, siendo bordeado cada nódulo claramente por microfisuras de manera similar a lo que Lins et al [59] encontraron y que sugiere impacto con ángulos de incidencia elevados, incluso en su mayoría normales a la superficie erosionada Figura 4-15. A su vez, y en casos como en los grupos 4, 5, 7, 3 y 8, Figuras 3-36 a la 3-39 del capítulo 3 se alcanzan a distinguir grumos y nódulos (aunque éstos en mucha menor proporción) mucho más espaciados, algunos de los primeros con ciertos alargamientos, desgarros y mayores irregularidades superficiales, que advierten vacíos formados entre las capas que se observan predominantemente como laminillas superpuestas y que denotan ángulos de impacto medio-bajos, cercanos a los 30°. Según Lins, el mecanismo de desgaste relacionado con desgarros, podría ser compensado en alguna medida, mejorando la resistencia a la tracción y la ductilidad del material.

Figura 4-15. Fotografía SEM polímero erosionado. [59]



5. Conclusiones y recomendaciones

Para todas las posiciones de la cámara de molienda analizada, el material con el mejor desempeño fue la lámina recubierta por soldadura. Sin embargo para bajas velocidades, cercanas a la zona del separador del molino podría evaluarse en detalle la posibilidad de recubrir la superficie con material termotratado, dada su respuesta a desgaste similar al de la lámina recubierta pero teniendo características económicas mucho más favorables.

El ataque superficial del flujo sobre las diferentes zonas de la cámara de molienda es de tipo oblicuo, esto evidenciado por los mecanismos de desgaste de la lámina recubierta. El mecanismo no fue frágil por impacto normal sino precisamente un mecanismo dúctil con deformación y posterior remoción de material. De igual manera, el mecanismo polimérico es una respuesta marcada a incidencia oblicua, dado que hubo microfisuración de la superficie perpendicular a la dirección del flujo en cambio de tener deformación plástica y rebote, que sería la respuesta esperada al tener impacto normal.

A partir del análisis de los mecanismos de desgaste para cada material, se puede concluir lo siguiente:

- El mecanismo de desgaste predominante de la lámina recubierta por soldadura es arado con deformación plástica leve. En menor proporción se presenta fisuración directa con la consecuente remoción de carburos manifiestas por socavaciones.
- El mecanismo de desgaste predominante de la lámina termotratada es arado con posterior formación de rebordes, fisuración y pérdida de material por impactos sucesivos.
- El mecanismo de desgaste predominante de la lámina recubierta con silicona es fisuración, interconexión de fisuras y posterior pérdida de material
- Es posible utilizar lámina termotratada en la zona del grupo 8, dado que su tasa de desgaste es similar a la lámina recubierta
- Es posible utilizar lámina recubierta con silicona en las zona 5, con predominancia sobre la lámina termotratada, dado que su tasa de desgaste es menor a la lámina termotratada en esta zona

Aun cuando el material polimérico no tuvo el comportamiento que se esperaba cuando se propuso el desarrollo de esta investigación, los resultados obtenidos permitirán en primer lugar redistribuir los materiales de revestimiento dentro de la cámara del molino, teniendo en cuenta el balance de costos, seguridad industrial y mantenibilidad. Por otra parte brinda las herramientas para fundamentar investigaciones posteriores con materiales poliméricos compuestos que permitan ejercer una mejor respuesta ante el crecimiento de las grietas en la superficie e incluso que ofrezca una mejor resistencia al corte a partir de las partículas de erosivo con bordes afilados como la sílice presente en la mayoría de las materias primas que se agregan para fabricar el cemento.

ANEXO A: Fichas Técnicas de Silicona Utilizadas en Ensayos Preliminares

Technical Data Sheet



LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV

November 2004

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV provides the following product characteristics:

Technology	Silicone
Chemical Type	Acetoxy silicone
Appearance (uncured)	Red homogeneous paste ^{LMS}
Components	One component - requires no mixing
Thixotropic	Reduced migration of liquid product after application to substrate
Cure	Room temperature vulcanizing (RTV)
Application	Gasketing or Sealing
Flexibility	Enhances load bearing & shock absorbing characteristics of the bond area.
Specific Application	Gasket dressing
Specific Benefit	Good temperature resistance.

LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV is used for gasketing and sealing applications for both plant maintenance and small, medium, and large-sized OEM. It is specially formulated to meet the low silicone volatiles requirements of the automotive industry for 315°C flange sealants. As a formed-in-place gasket/sealant, LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV has been designed to give outstanding performance in typical automotive gasketing applications including valve covers, rocker covers, oil pans, water pumps, end seals, intake manifolds, and rear axle housings. This product is also used as a sealant and adhesive for assembly and repair of industrial furnaces, ovens, boilers, exhaust stacks, high temperature ducting, and heating elements in electrical appliances. This product is typically used in applications up to 315 °C.

Mil-A-46106A

LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV is tested to the lot requirements of Military Specification Mil-A-46106A.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C	1.05
Extrusion Rate, g/min:	
Pressure 0.62 MPa, time 15 seconds, temperature 25 °C:	
Semco Cartridge	≥250 ^{LMS}
Flash Point - See MSDS	
Odor	Acetic Acid

TYPICAL CURING PERFORMANCE

LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV cures on exposure to moisture in the air. The product dries tack free in 1 hour and fully cures in 24 hours. Cure times will vary with temperature, humidity and gap.

TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 7 days @ 25 °C / 50% RH

Physical Properties:

Shore Hardness, ISO 868, Durometer A	≥18 ^{LMS}
Elongation, ASTM D 412, %	≥300 ^{LMS}
Tensile Strength, ASTM D 412	N/mm ² ≥1.5 ^{LMS} (psi) (≥217)

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

Cured @ 25 °C / 50±5% RH for 7 days, tested @ 25 °C, 3.2 mm thick film

Heat Aging

	Week(s) @ 204 °C			
	1	2	4	8
Shore Hardness, ISO 868, Durometer A	29	28	25	22
Tensile Strength, ISO 527, N/mm ²	2.0	2.2	2.3	1.9
Elongation, ASTM D 638, %	370	450	490	500

	Week(s) @ 260 °C			
	1	2	4	7
Shore Hardness, ISO 868, Durometer A	23	16	15	17
Tensile Strength, ISO 527, N/mm ²	1.3	0.7	0.4	0.3
Elongation, ASTM D 638, %	520	440	280	210

	Week(s) @ 316 °C		
	1	2	3
Shore Hardness, ISO 868, Durometer A	48	64	82
Tensile Strength, ISO 527, N/mm ²	1.4	1.6	1.5
Elongation, ASTM D 638, %	175	70	25

At 260°C, softening is due to reversion and will occur regardless of how the sealant is cured. For flange sealing, this softening is usually an attribute.

At 315°C, hardening is due to thermal rearrangement of the polymer and also oxidation. Oxidation is retarded when the product is used as a flange sealant.

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).



Directions for use

1. For best performance bond surfaces should be clean and free from grease.
2. Full performance properties will develop over 24 hours.
3. Moisture curing begins immediately after the product is exposed to the atmosphere, therefore parts to be assembled should be mated within a few minutes after the product is dispensed.
4. Press or firmly clamp parts together. Do not slide parts together.
5. Excess material can be easily wiped away with non-polar solvents.
6. Excess cured material can be removed with a knife or single edge razor blade.

NOTE: Do not use LOCTITE® Superflex® Red High Temp RTV for gasketing carburetors or fuel control devices where it will be in constant contact with hydrocarbon fuels. Material will develop excessive swell and loss of mechanical properties.

Loctite Material Specification^{LMS}

LMS dated April 20, 2000. Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Quality.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

(°C x 1.8) + 32 = °F
 kV/mm x 25.4 = V/mil
 mm / 25.4 = inches
 N x 0.225 = lb
 N/mm x 5.71 = lb/in
 N/mm² x 145 = psi
 MPa x 145 = psi
 N-m x 8.851 = lb-in
 N-m x 0.738 = lb-ft
 N-mm x 0.142 = oz-in
 mPa·s = cP

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 1

Ficha Técnica de Producto



Sista F 110 Plásticos, Metales y Mampostería

1. PRODUCTO

DESCRIPCIÓN:

Sista F 110 Plásticos, Metales y Mampostería es un sellador monocomponente 100% silicón, de curado neutro y de alto desempeño, formulado para sellar en juntas de materiales poco convencionales como plásticos, metales y materiales porosos de mampostería en interiores y exteriores. Cura rápidamente con la humedad del ambiente formando un hule elástico muy resistente.

2. PRINCIPALES BENEFICIOS

- No es corrosivo.
- Excelente resistencia a los rayos UV y humedad.
- No se encoge, no se despegue, no se agrieta y no se amarillea con el paso del tiempo.
- Seca al tacto en minutos, formando un sello a prueba de agua que evita fugas y filtraciones.
- Cumple con la norma ASTM C 920.
- Aplicación fácil y limpia, sin escurrir.
- Resistente a altas y bajas temperaturas.
- Usado correctamente puede ayudar a ahorrar energía.

3. CAMPOS DE APLICACIÓN

Sista F 110 Plásticos, Metales y Mampostería está indicado para sellar profesionalmente:

- Juntas de expansión.
- Sellados de techos metálicos y cubiertas de acrílicos.
- Ventanería de PVC.
- Láminas de policarbonato (probar compatibilidad antes de usarse).
- En mampostería.
- Emboquillado alrededor de puertas y ventanas.
- Canales de desagüe de PVC y lámina.
- Con excelente adhesión a varicos materiales lisos y porosos como metales, plásticos, láminas metálicas, PVC, concreto, fibrocemento, yeso, ladrillo, teja y asbesto.

4. INFORMACIÓN TÉCNICA

PROPIEDADES:

- Consistencia de pasta suave y ligera.

MATERIAS PRIMAS BÁSICAS:

- Polímero de silicón, cargas y catalizador.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS:

(Valores típicos, no especificaciones)

Densidad:	1.02 ± 0.01 g/ml
Color:	Neutro (bajo clor)
Dureza:	30 puntos (ASTM D2240)
Fuerza de ruptura:	230 psi (ASTM D412)
Elongación a ruptura:	350 % (ASTM D412)



PROPIEDADES FUNCIONALES:

(Los tiempos indicados pueden tener variaciones dependiendo de las condiciones de humedad y temperatura del ambiente, de la caducidad del producto, del tamaño de la junta y del uso que se le dé al producto)

Tempo de trabajo:	5 min
(23-25° C, 50% HR)	
Secado al tacto:	6 min
(23-25° C, 50% HR)	
Formación de película:	8 min
(23-25° C, 50% HR)	
Tack-Free:	120 min
(23-25° C, 50% HR)	
Temperatura de aplicación:	-37°C a 60°C
Temperatura de servicio:	-62°C a 177°C (210°C intermitente)
Printable:	No
Caducidad:	Aprox. 12 meses
Durabilidad:	+ 30 años
Relación de curado:	2 a 3 mm/ día
Movimiento dinámico de juntas:	± 25%



Henkel Capital, S.A. de C.V.

Atención al cliente: 01 800 705 9200

www.henkel.com.mx

PTO. VALLARTA

Tel. 01 (329) 29-65-824

MATRIZ GDL

Tel. 01 (33) 3615-5432

SUC. ZAPOPAN

Tel. 01 (33) 3616-6677

contacto@impermeabilizantesfester.com.mx

www.impermeabilizantes-fester.com / www.impermeabilizantesfester.com.mx

GRUPO
IMPERGAMA
IMPERMEABILIZANTES





Sista F 110 Plásticos, Metales y Mampostería

5. APLICACIÓN

Sista F 110 Plásticos, Metales y Mampostería viene listo para ser usado. Se aplica desde el cartucho con una pistola estándar de calafateo mecánica sin ningún tipo de tratamiento especial.

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE:

- Remueva con un paño seco todo el polvo, grasa, humedad y suciedad de las superficies antes de aplicar el producto.
- Utilice solventes tales como xileno, tolueno ó alcohol isopropílico, no utilice thinner, aguarrás, petróleo ni soluciones jabonosas.

APLICACIÓN:

- Coloque cinta para enmascarar en ambos lados de la junta.
- Corte la punta roscada del cartucho perpendicularmente y atomille la pipeta en la rosca.
- Posteriormente corte diagonalmente la pipeta calculando cubrir el área requerida.
- Coloque el cartucho en la pistola de calafateo y aplique el sellador rellenando la ranura.
- Repase la aplicación con una espátula de punta redonda o con una cuchara pequeña, antes de que transcurran 5 minutos (23-25°C, 50% HR).
- Quite la cinta para enmascarar y limpie el exceso de sellador con un solvente antes de que se seque.
- Después de que el material ha curado, puede ser removido mecánicamente (con cutter o navaja).

6. RENDIMIENTO

RENDIMIENTO ESTIMADO:

		METROS LINEALES POR CARTUCHO DE 300 ml						
		Ancho de la junta en mm						
Profundidad de la junta en mm	3	7	10	12	16	19	25	
	3	32	14	10	8	6	5	4
	5		8	6	5	4	3	2
	7		6	4	3	3	2	1.5
	10			3	2.5	2	1.5	1.2
12				2	1.5	1	1	

Los valores de esta tabla son aproximados.

7. PRESENTACIONES

- Cartucho plástico de 300 ml con pipeta
Colores: Transparente y blanco

UNIDAD DE EMBARQUE:

Caja con 12 cartuchos de 300 ml

8. ALMACENAMIENTO / TIEMPO DE VIDA

- Debe almacenarse en un lugar fresco y seco (menos de 32°C).
- El tiempo de vida es de aproximadamente 12 meses para cartuchos que no han sido abiertos.

9. NOTAS DE APLICACIONES Y LIMITACIONES

- No es pintable.
- No se usa para embridado estructural.
- No utilizar en láminas de grandes dimensiones de policarbonato.
- No utilizar en aplicaciones bajo agua, en superficies húmedas, o en áreas donde exista abrasión.
- Cuando vulcaniza desprende oximas que son dañinas para el organismo.

10. PRECAUCIONES

- Utilice el producto en lugares ventilados, ya que en periodos de exposición prolongada el producto puede irritar los ojos y las vías respiratorias.
- En caso de contacto con ojos o piel, lave inmediatamente con agua.
- Si persiste la irritación, consulte a su médico.
- Manténgase fuera del alcance de los niños.

Las instrucciones anteriores se basan en ensayos completos y en la experiencia general ganada en este campo. Puesto que es imposible examinar todos los métodos de la instalación y en vista de las diversas condiciones de trabajo, no podemos, sin embargo, declarar que la información dada es completa. Por lo tanto recomendamos que las pruebas se deban realizar para asegurar el éxito. Garantizamos un estándar de calidad uniforme para este producto. Para las aplicaciones no especificadas en esta ficha técnica, se recomienda contactar a nuestros asesores técnicos y realizar pruebas previas.

Henkel Calidad para Profesionales

Henkel Capital, S.A. de C.V.

Atención al cliente: 01 800 705 9200

www.henkel.com.mx

LOCTITE SI 5699C

July 2016

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE SI 5699C provides the following product characteristics:

Technology	Silicone
Appearance	White
Components	One-component
Product Benefits	<ul style="list-style-type: none"> • Fire resistant • Non-corrosive • Non-conductive • Water resistant • Excellent environmental resistance • Excellent cold and heat aging
Cure	Room temperature vulcanizing (RTV)
Application	Gasketing and sealing
Typical Assembly Applications	Adhering and sealing electronic wiring
Operating Temperature	-50 to 200 °C

LOCTITE SI 5699C silicone sealant has excellent adhesion and can be used to seal electronic components.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity	1.45 to 1.6
Shelf Life (@ 27°C, days)	365
Flash Point - See SDS	

TYPICAL CURING PERFORMANCE

LOCTITE SI 5699C cures on exposure to moisture in the air. Cure times vary with temperature, humidity and gap size.

Tack Free Time

Tack Free Time, minutes	≤20
-------------------------	-----

TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL
Physical Properties

Shore Hardness, Shore A	55 to 65
Tensile Strength, N/mm ²	≥1.5
Elongation @ break, %	≥100
Peel Strength, K/Nm	≥0.8

Electrical Properties

Dielectric Constant / Dissipation Factor @ 1 MHz	3.0/0.001
Volume Resistivity, ohm-cm	2.54×10 ¹⁴
Dielectric Strength, KV/mm	≥14

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL
Shear Strength

Lap Shear Strength:		
Aluminum	N/mm ²	≥0.8
	(psi)	(≥116)

GENERAL INFORMATION

For safe handling information on this product, consult the Safety Data Sheet, (SDS).

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

Not for product specifications

The technical data contained herein are intended as reference only. Please contact your local quality department for assistance and recommendations on specifications for this product.

DIRECTIONS FOR USE

1. Bonding surfaces should be clean of contaminants such as paint, dirt, oil or other foreign matter.
2. Moisture curing begins immediately after product is exposed to the atmosphere. Parts should be assembled within a few minutes after the product is applied.

STORAGE:

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage : 27 °C

Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

(°C x 1.8) + 32 = °F
 kV/mm x 25.4 = V/mil
 mm / 25.4 = inches
 N x 0.225 = lb
 N/mm x 5.71 = lb/in
 psi x 145 = N/mm²
 MPa = N/mm²
 N-m x 8.851 = lb-in
 N-m x 0.738 = lb-ft
 N-mm x 0.142 = oz-in
 mPa-s = cP

Disclaimer**Note:**

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada Corporation, the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage: [Except as otherwise noted] All trademarks in this document are trademarks and/or registered trademarks of Henkel and its affiliates in the U.S. and elsewhere.

ANEXO B: Resultados pruebas preliminares siliconas y acero Ni-Hard

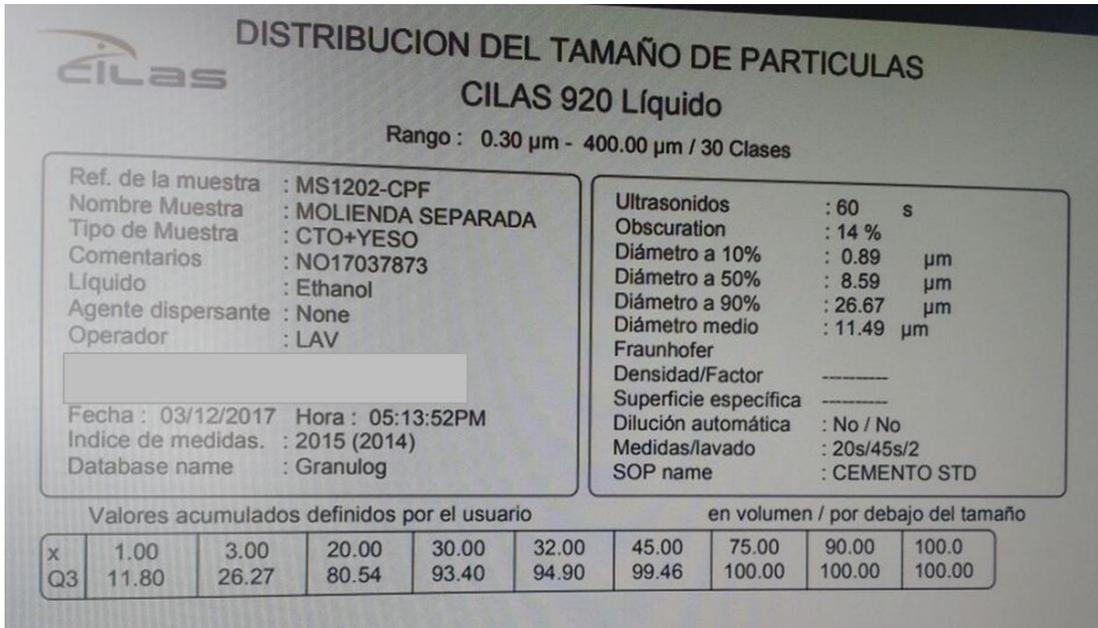
		Silicona F110			
		30°	Variación	45°	Variación
Inicial	Peso (gr)	308,5	0%	327	0%
	Dureza (Sh A)	10,5	0%	11	0%
Después de 5 min ensayo	Peso (gr)	308,5	0%	327	0%
	Dureza (Sh A)	13,5	29%	16,5	50%
Después de 20 min ensayo	Peso (gr)	306,6	-0,62%	325,7	-0,40%
	Dureza (Sh A)	15,5	48%	17	55%

		Silicona RTV			
		30°	Variación	45°	Variación
Inicial	Peso (gr)	289,7	0%	337,2	0%
	Dureza (Sh A)	23	0%	21	0%
Después de 5 min ensayo	Peso (gr)	289,7	0%	337,2	0%
	Dureza (Sh A)	26	13%	19	-10%
Después de 20 min ensayo	Peso (gr)	288,4	-0,4%	335,5	-0,5%
	Dureza (Sh A)	29	26%	20	-5%

		Silicona 5699			
		30°	Variación	45°	Variación
Inicial	Peso (gr)	276	0%	283,5	0%
	Dureza (Sh A)	70	0%	53	0%
Después de 5 min ensayo	Peso (gr)	276,1	0%	283,6	0%
	Dureza (Sh A)	75	7%	57	8%
Después de 20 min ensayo	Peso (gr)	274,1	-0,7%	282,3	-0,4%
	Dureza (Sh A)	78	11%	64	21%

		Ni-hard			
				45°	Variación
Inicial	Peso (gr)			909,8	0%
	Dureza (Sh A)			55	0%
Después de 5 min ensayo	Peso (gr)			---	---
	Dureza (Sh A)			---	---
Después de 20 min ensayo	Peso (gr)			887,9	-2,41%
	Dureza (Sh A)			55,2	0,4%

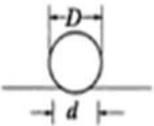
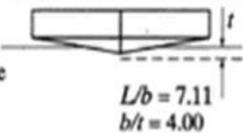
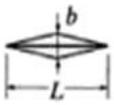
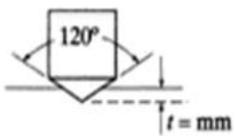
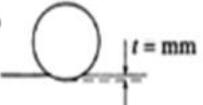
ANEXO C: Distribución Granulométrica Típica en un Molino de Cemento

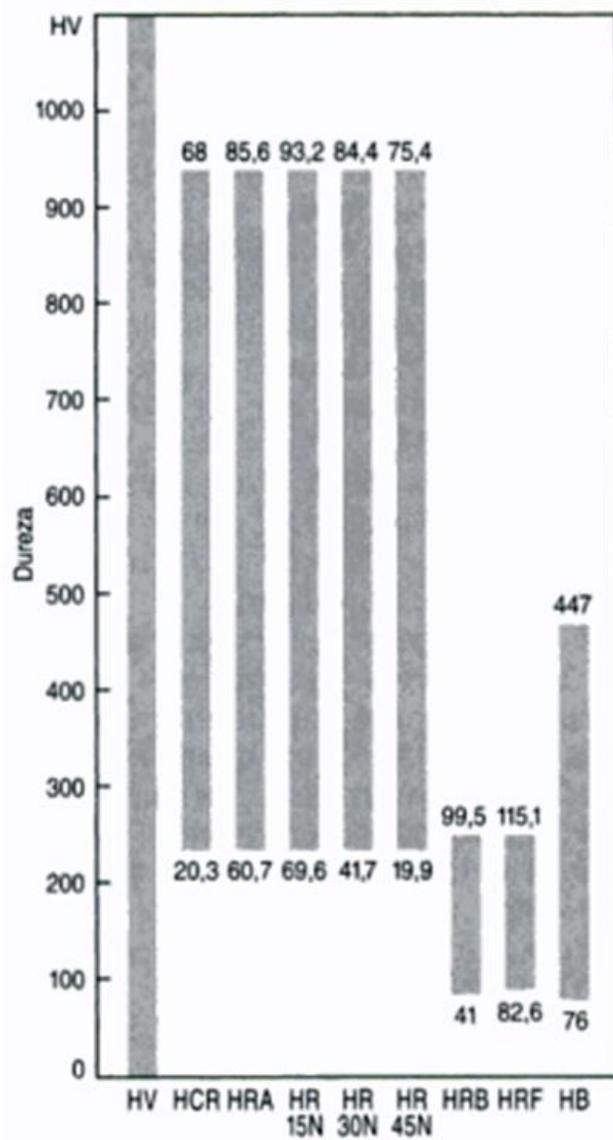


ANEXO D: Tabla de Composición y Durezas de algunos Materiales Recubiertos

No.	Coating	Chemical composition	Hardness HV30	Deposition method
1	Colmonoy 237	B = 1.3%, Cr = 4%, Si = 2.8%, others - 5.15%, Ni-bal.	379	Flame
2	Buildup 22	C = 0.1%, B = 1.25%, Si = 3.15%, Fe = 0.75%, Ni-bal.	289.5	Flame
3	Deloro alloy 60	C = 0.9%, Si = 4.3%, B = 3.3%, Fe = 4.2%, Cr = 16.3%, Ni-bal.	795	Flame
4	Deloro alloy 50	C = 0.45%, Si = 3.9%, B = 2.3%, Fe = 2.9%, Cr = 11%, Ni-bal.	734	Flame
5	Deloro alloy 40	C = 0.25%, Si = 3.5%, B = 1.8%, Fe = 2.5%, Cr = 7.5%, Ni-bal.	618	Flame
6	Deloro alloy 56	C = 0.6%, Si = 4.2%, B = 3.6%, Fe = 3%, Cr = 16.2%, Mo = 2.6%, Cu = 2.6%, Ni-bal.	796	Flame
7	Stellite grade 6	C = 1.2%, Si = 1.2%, Ni = 3%, Mo = 0.5%, Fe = 3.0%, Cr = 28%, W = 4%, Co-bal.	391.5	TIG
8	El-Co 1	C = 2.33%, Si = 1.16%, Cr = 30.6%, Ni = 2.73%, W = 12.2%, Fe = 2.71%, Co-bal.	529	TIG
9	Deloro Alloy 35	C = 0.17%, Si = 3.1%, B = 1.5%, Fe = 1.6%, Cr = 4.7%, Ni-bal.	329.5	Flame
10	Colmonoy 43	C = 0.4%, Cr = 10%, B = 2.1%, Si = 2.3%, Fe = 3%, Ni-bal.	348	Flame
11	PMCo45	C = 0.7%, B = 0.8%, Si = 1.3%, Cr = 30%, W = 4%, Co-bal.	618	PTA
12	PMNi30	C = 0.1%, B = 1.4%, Si = 3%, Fe = 1.5%, Ni-bal.	223	PTA
13	PMFeCr-60/P	C + B + Si = 7%, Cr = 12%, Fe = 80%	496	PTA
14	PMNiCr55P	C = 0.4%, B = 2.6%, Cr = 12%, Fe = 2.6%, Ni-bal.	618	PTA

ANEXO E: Características de los Principales Ensayos de Dureza

Ensayo	Indentador	Forma de la indentación		Carga, P	Número de dureza				
		Vista lateral	Vista superior						
Brinell	Bola de acero de 10 milímetros o de carburo de tungsteno			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$				
Vickers	Pirámide de diamante			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$				
Knoop	Pirámide de diamante			25g-5kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$				
Rockwell				kg					
A } C } D }	Cono de diamante			60	HRA } HRC } HRD } = 100 - 500r				
B } F } G }				Bola de acero de 1/16" de diámetro				100	HRB } HRF } HRG } = 130 - 500r
E								Bola de acero de 1/8" de diámetro	



ANEXO F: Fotografías Generales Finales de las Unidades Experimentales

Las fotografías se organizaron de manera general por los 7 grupos analizados y a su vez por los 3 tipos de materiales dentro de cada uno de los grupos. Cada fotografía está rotulada con el número de identificación y el material correspondiente.

GRUPO 1



61 Recubierta. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura. Cordones adyacentes.



44 Recubierta. Fisuración transversal superficial propia del proceso de soldadura.



7 Recubierta. Fisuración transversal al interior del cordón propia del proceso de soldadura. Fractura y remoción de material duro por mecanismo de desgaste característico.



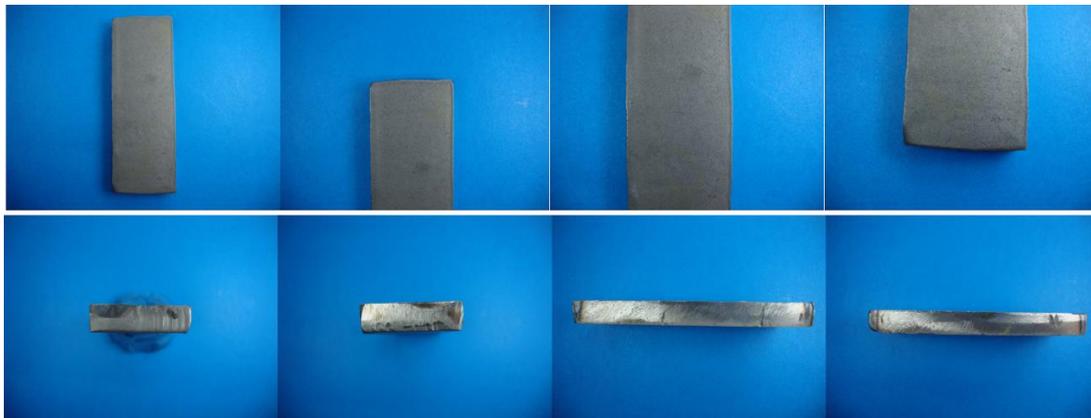
33 Recubierta. Fisuración transversal leve propia del proceso de soldadura. Altura de cordón no homogénea y por tanto pérdida de volumen no homogéneo.



19 Recubierta. Fisuración transversal que penetra el cordón, propio del proceso de soldadura. Fractura y remoción de material duro por mecanismo de desgaste característico.



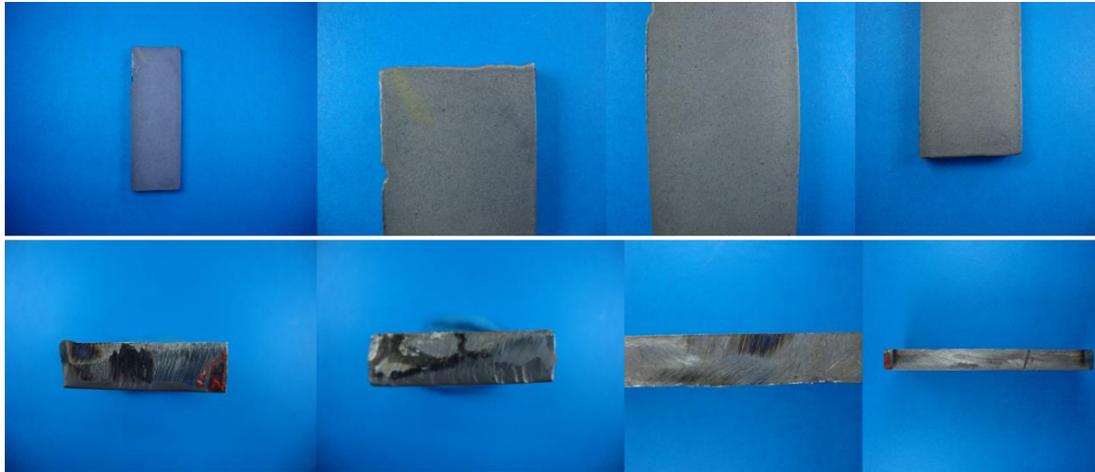
27 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme hacia el centro y reborde marcado.



32 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Se aprecia penetración considerable del temple bajo la superficie de trabajo



56 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Huellas de sobrecalentamiento generadas en el proceso de preparación de la probeta.



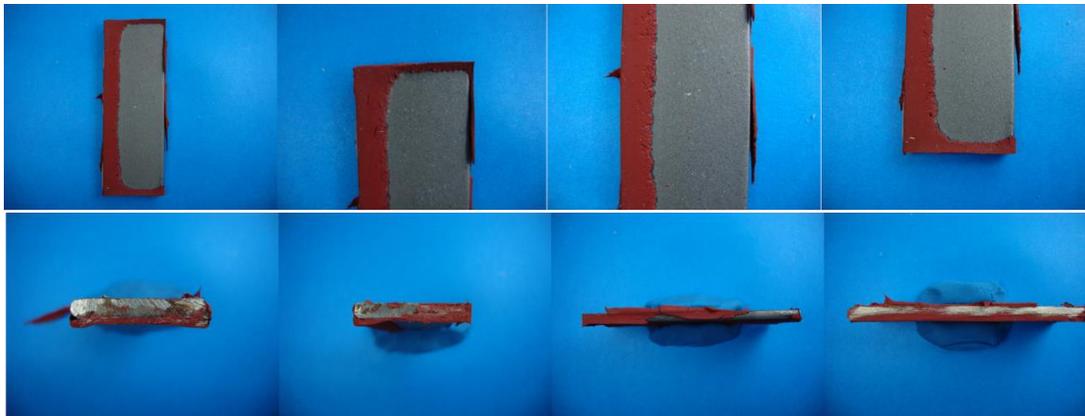
61 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Daño lateral en cara de trabajo por deficiente control del proceso de preparación de la probeta.



62 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Se aprecia penetración considerable del temple bajo la superficie de trabajo



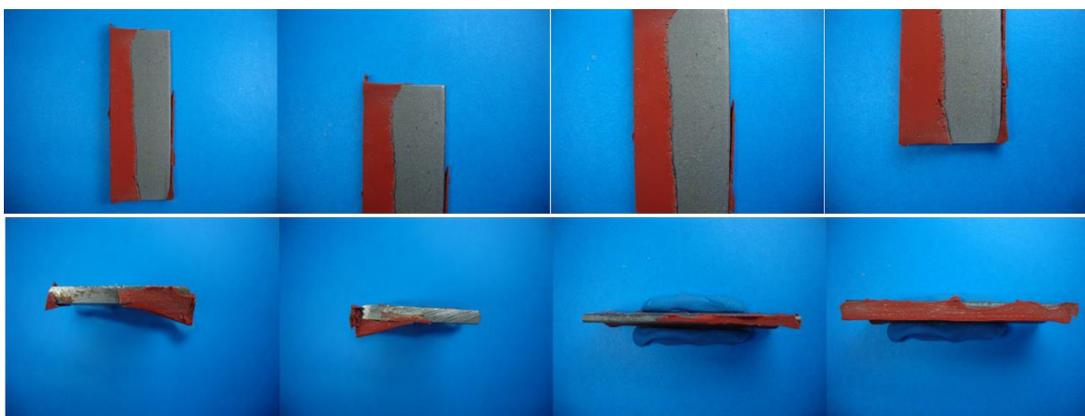
1 Polimérica. Cortes profundos sobre la superficie del material. Desgaste severo con pérdida de material en la dirección del flujo.



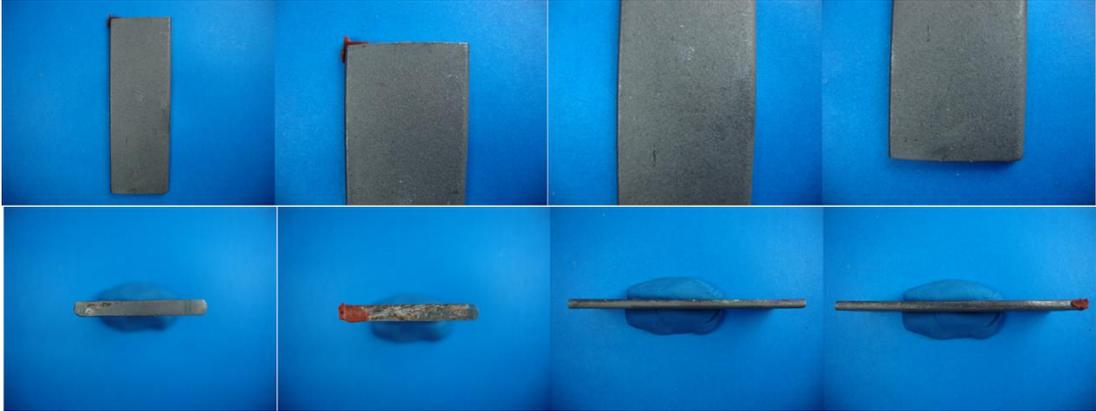
4 Polimérica. Desgaste severo en la dirección del flujo. Pérdida de volumen del recubrimiento superior al 90%



5 Polimérica. Desgaste severo en la dirección del flujo. Pérdida de volumen del recubrimiento superior al 90%

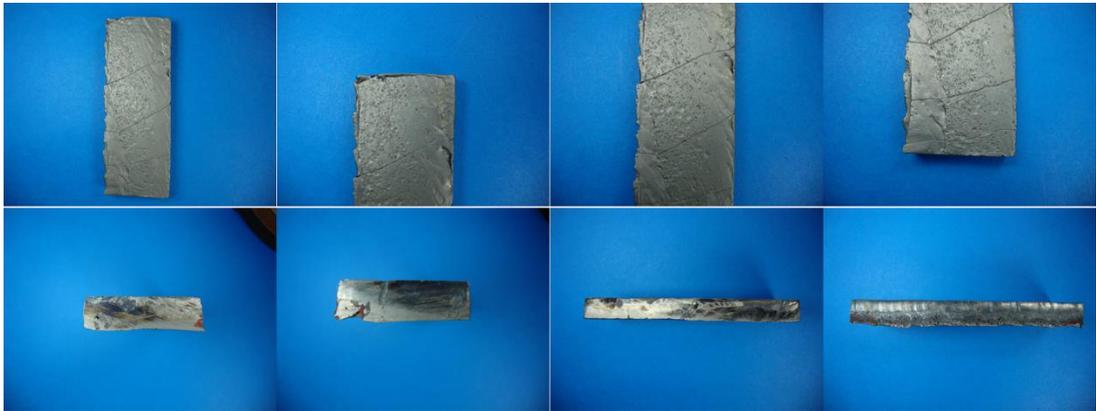


28 Polimérica. Desgaste severo en la dirección del flujo. Pérdida de volumen del recubrimiento superior al 90%



43 Polimérica. Pérdida total del recubrimiento polimérico. Desgaste severo.

GRUPO 2



12 Recubierta. Fisuración transversal que penetra el cordón, propio del proceso de soldadura. Fractura y remoción de material duro por mecanismo de desgaste característico. Heterogeneidad en el cordón de recubrimiento.



14 Recubierta. Fisuración transversal que penetra el cordón, propio del proceso de soldadura. Fractura y remoción de material duro por mecanismo de desgaste característico. Heterogeneidad en el cordón de recubrimiento



27 Recubierta. Fisuración transversal que penetra el cordón, propio del proceso de soldadura. Fractura y remoción severa de material duro por mecanismo de desgaste característico. Heterogeneidad en el cordón de recubrimiento.



60 Recubierta. Fisuración transversal que penetra el cordón, propio del proceso de soldadura. Remoción heterogénea de material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



44 Termotrada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Desgaste lateral severo.



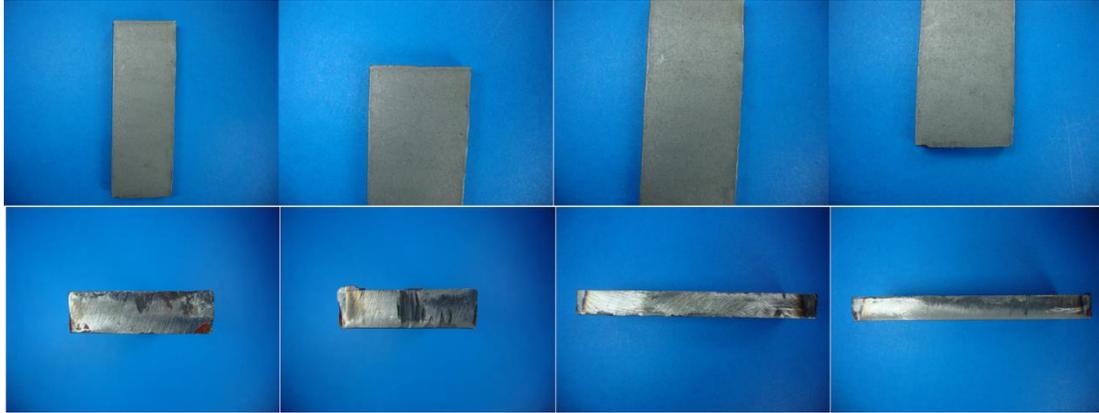
24 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme.



16 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta.



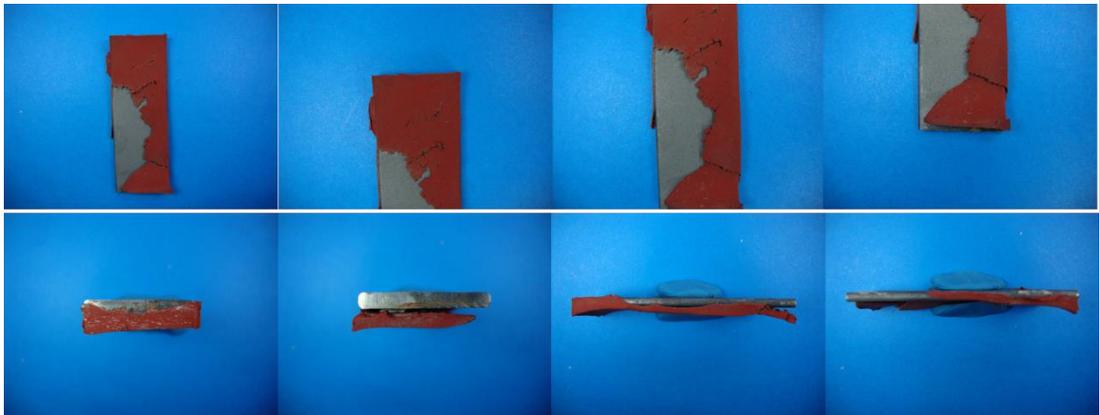
14 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme.



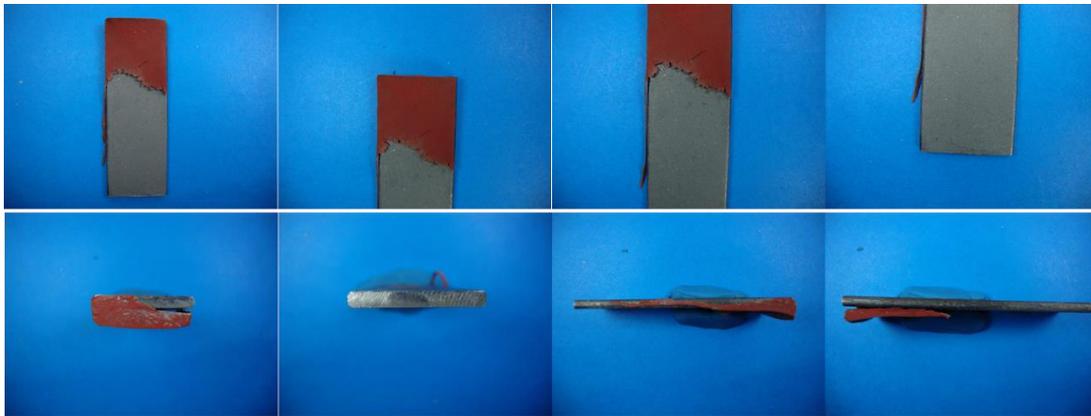
41 Termorata. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Se aprecia buena penetración del temple.



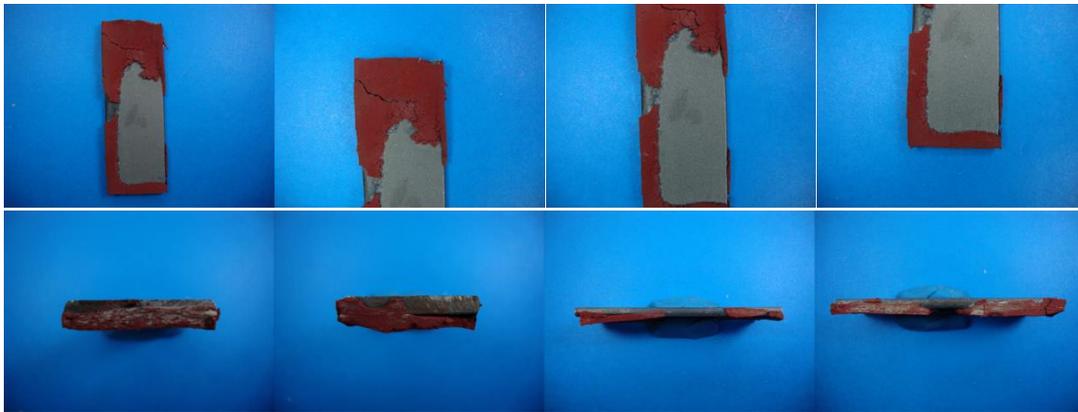
63 Termotrada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Reborde marcado por desgaste.



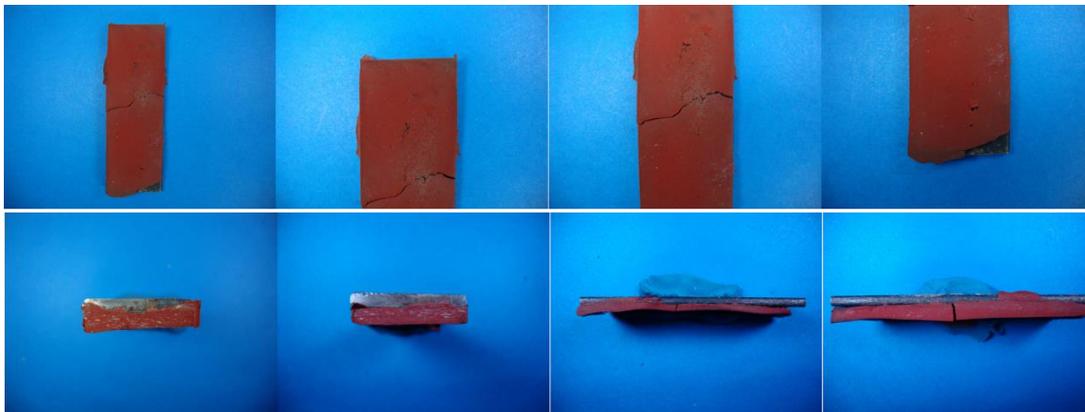
60 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo. Pérdida de material del orden del 80%



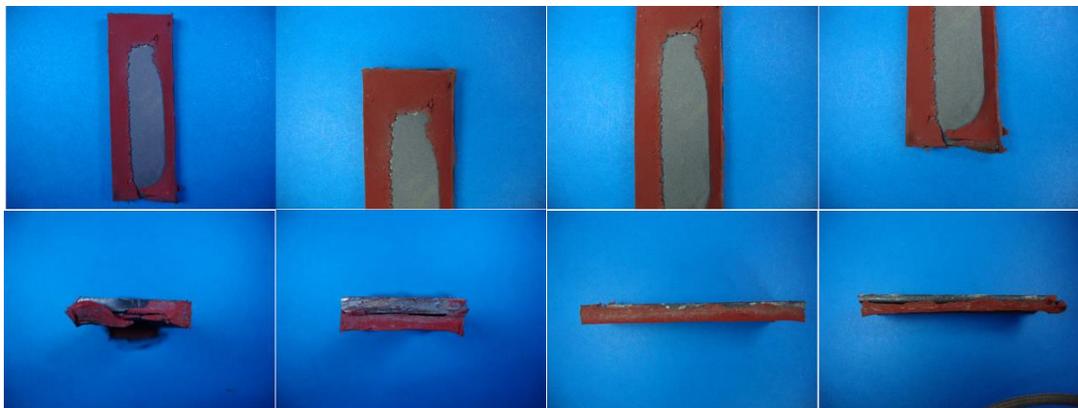
61 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo. Pérdida de material del orden del 90%



58 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo. Pérdida de material del orden del 90%



47 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo oblicuo. Pérdida de material del orden del 70%, sin daño sobre material base.



11 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo oblicuo. Pérdida de material del orden del 80%.

GRUPO 3



1 Recubierta. Fisuración transversal superficial, propio del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior. Porosidades entre cordones.



31 Recubierta. Fisuración transversal superficial, propio del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones.



37 Recubierta. Fisuración transversal superficial. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Heterogeneidad en la altura del recubrimiento.



45 Recubierta. Fisuración transversal superficial, propio del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior. Porosidades entre cordones.



29 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Penetración heterogénea del temple.



34 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Se aprecia buena penetración del temple.



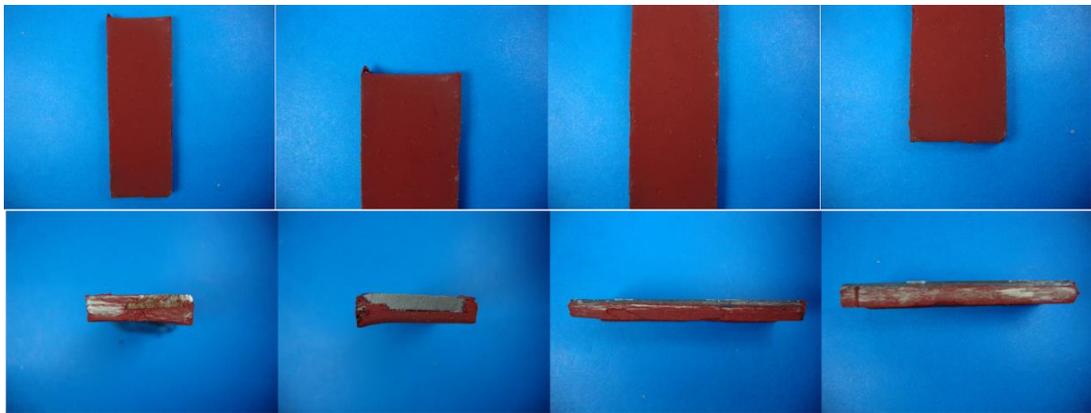
36 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y leves rebordes por desgaste.



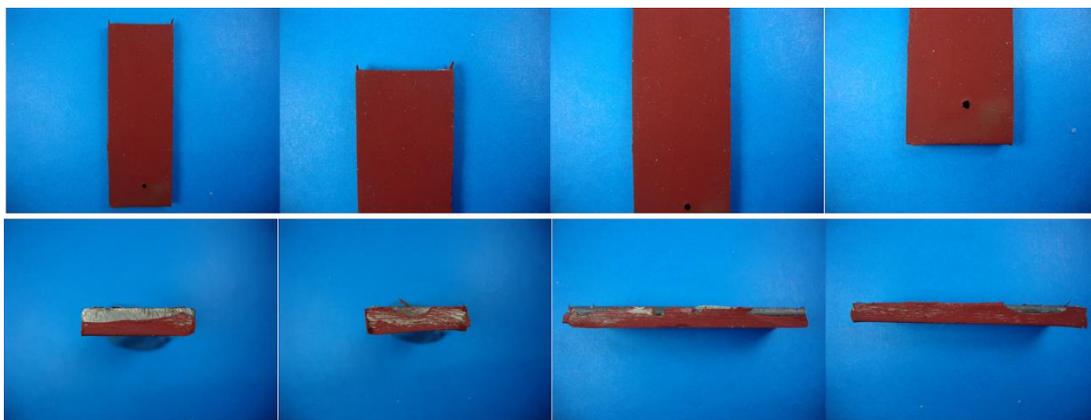
43 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Penetración heterogénea del temple.



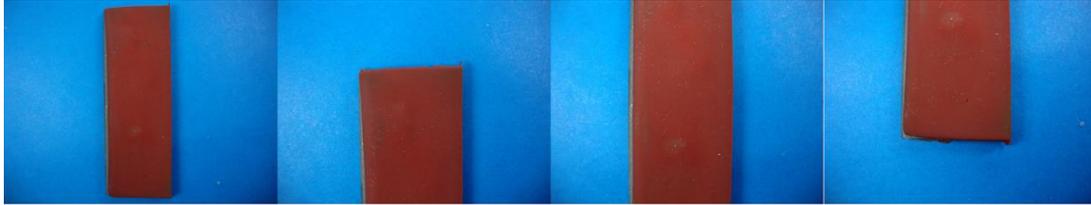
58 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y leves rebordes por desgaste. Penetración heterogénea del temple.



12 Polimérica. Desgaste superficial leve en dirección de flujo. Pérdida de material del 30%.



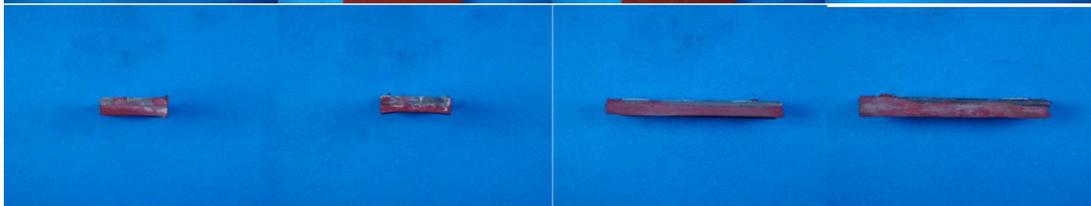
14 Polimérica. Desgaste superficial leve en dirección de flujo. Pérdida de material del 35%. Imperfección del proceso de fabricación de la probeta.



18 Polimérica. Desgaste superficial leve en dirección de flujo. Pérdida de material del 50%. Pérdida de adherencia del recubrimiento sobre material base.



20 Polimérica. Desgaste superficial en dirección de flujo. Pérdida de material del 40%. Cortes severos aislados sobre la superficie.



26 Polimérica. Desgaste superficial leve en dirección de flujo. Pérdida de material del 40%. Pérdida de adherencia del recubrimiento sobre material base. Cortes severos aislados.

GRUPO 4



3 Recubierta. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior. Defectos severos entre cordones.



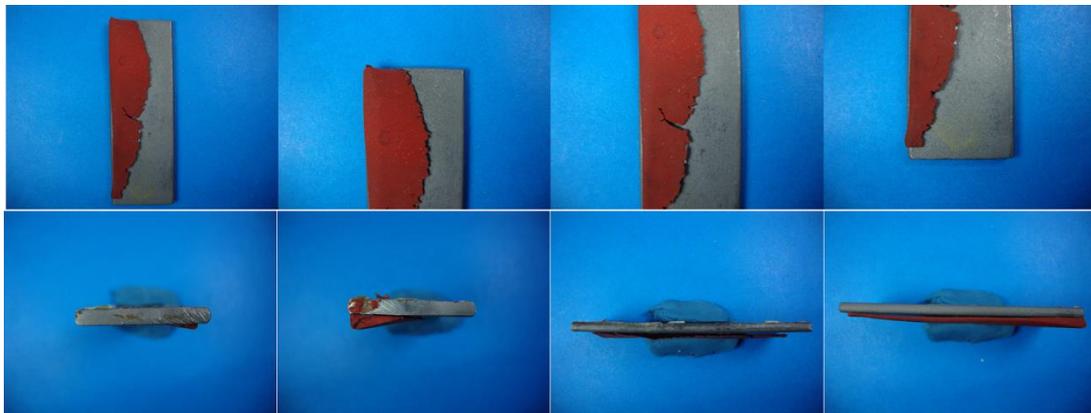
9 Recubierta. Fisuración transversal superficial, propio del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Porosidades entre cordones.



8 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y rebordes lateral severo por desgaste. Penetración heterogénea del tratamiento térmico.



18 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta.



25 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo. Pérdida de material del 90% con daño sobre superficie de material base.



46 Polimérica. Desgaste superficial en dirección de flujo. Pérdida de material del 70%. Cortes severos sobre la superficie consistentes con el mecanismo de desgaste característico.



50 Polimérica. Desgaste superficial en dirección del flujo oblicuo. Pérdida de material del 70%. Borde fisurado consistente con el mecanismo de desgaste característico.



53 Polimérica. Desgaste superficial en dirección del flujo oblicuo. Pérdida de material del 75%. Pérdida de material consistente con el mecanismo de desgaste característico.

GRUPO 5



6 Recubierta. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura y fracturas sobre los bordes laterales ocasionados a partir de la preparación de la probeta. Remoción de material por mecanismo de desgaste característico. Defectos severos entre cordones.



15 Recubierta. Fisuración transversal profunda con fractura propia del proceso de soldadura. Menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior. Defectos severos entre cordones.



26 Recubierta. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



38 Recubierta. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura, fractura durante la preparación de la probeta. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico.



43 Recubierta. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior. Probeta fabricada del borde de la lámina con menor material de recubrimiento.



4 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral severo por desgaste.



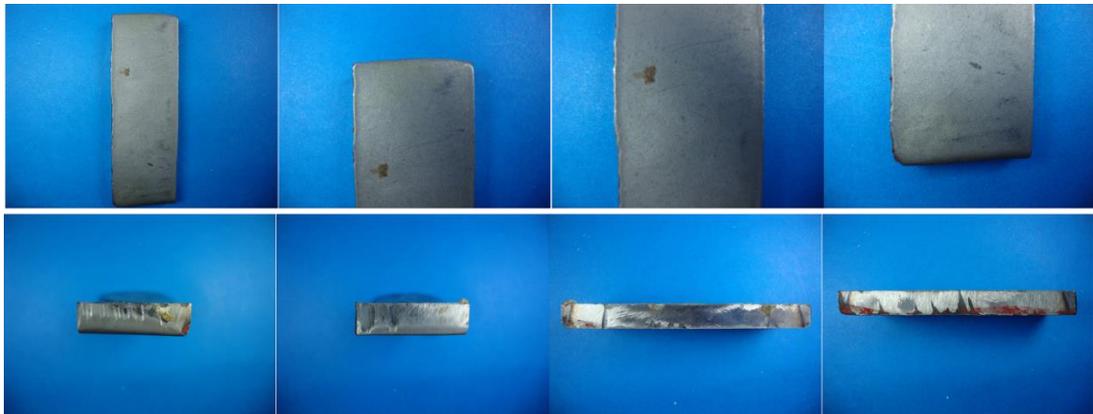
22 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral severo por desgaste. Penetración heterogénea del tratamiento térmico.



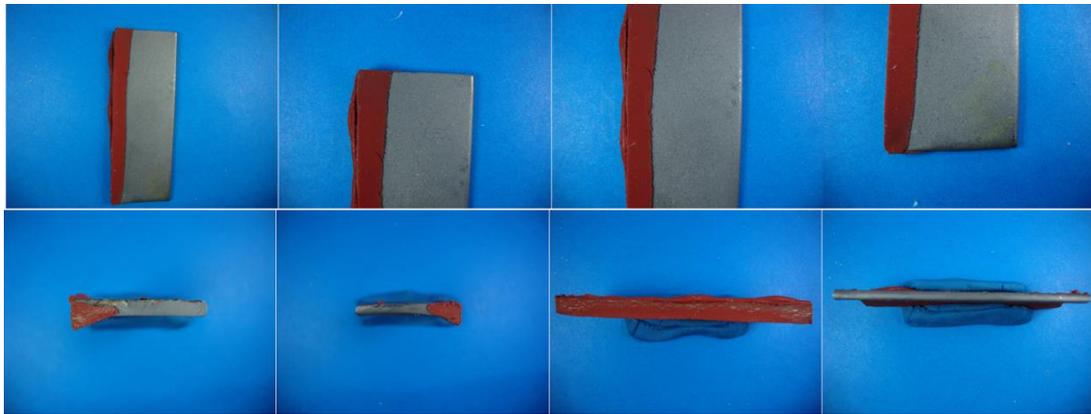
31 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral severo por desgaste. Desgaste superficial homogéneo.



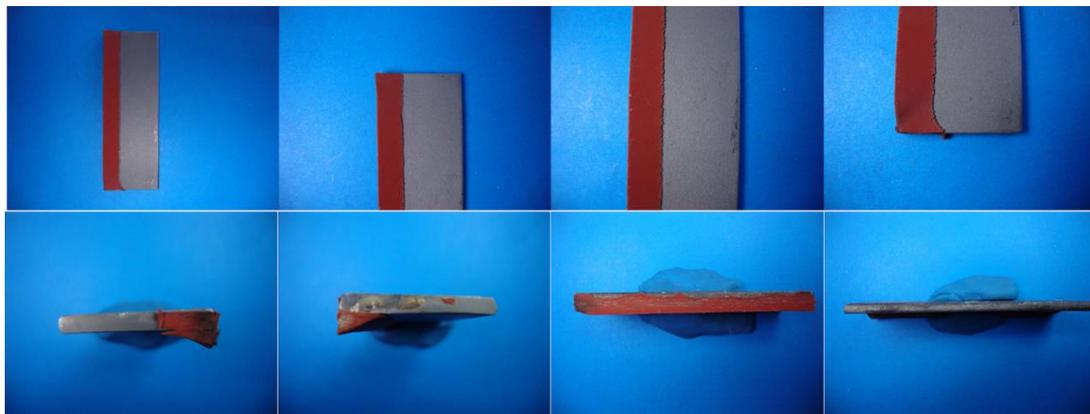
50 Termotratada. Desgaste superficial homogéneo. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral severo por desgaste.



51 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Desgaste superficial homogéneo.



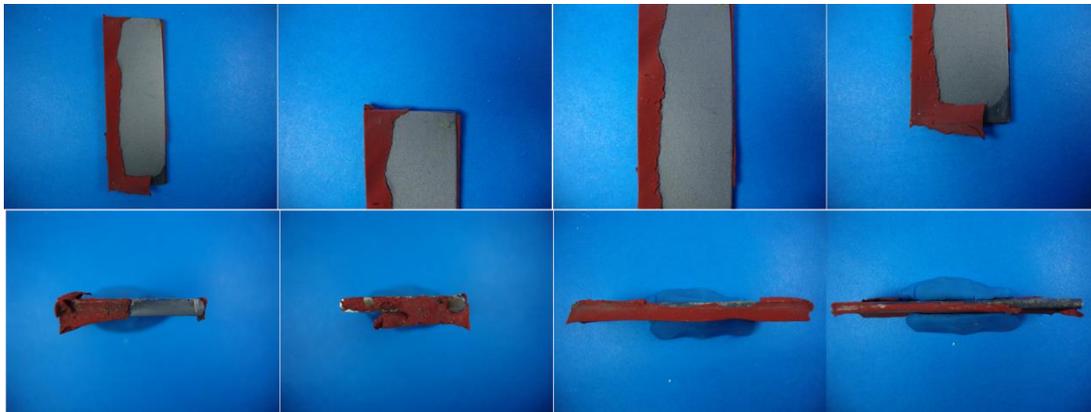
15 Polimérica. Desgaste superficial severo. Pérdida de material del 90%. Daño sobre material base.



16 Polimérica. Desgaste superficial severo. Pérdida de material del 90% que se aprecia sobre el borde fisurado consistente con el mecanismo de desgaste característico.



17 Polimérica. Desgaste superficial severo. Pérdida de material del 90% .



45 Polimérica. Desgaste superficial severo. Pérdida de adherencia con material base y pérdida de material de recubrimiento del 90% .



49 Polimérica. Desgaste superficial severo. Cortes, fisuración y pérdida de material del 85% consistente con el mecanismo de desgaste característico.

GRUPO 7



8 Recubierta. Defectos severos entre cordones. Fisuración transversal propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



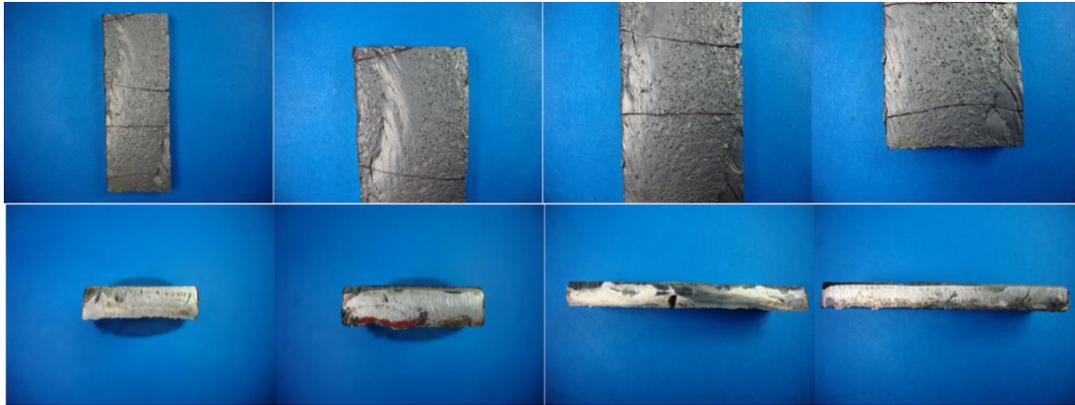
11 Recubierta. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



16 Recubierta. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones.



42 Recubierta. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



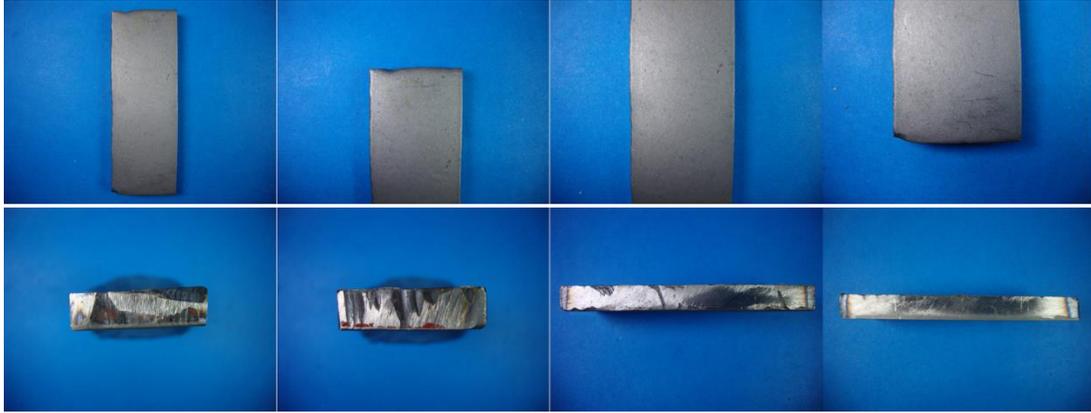
51 Recubierta. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Fisuración transversal profunda con fractura propia del proceso de soldadura. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



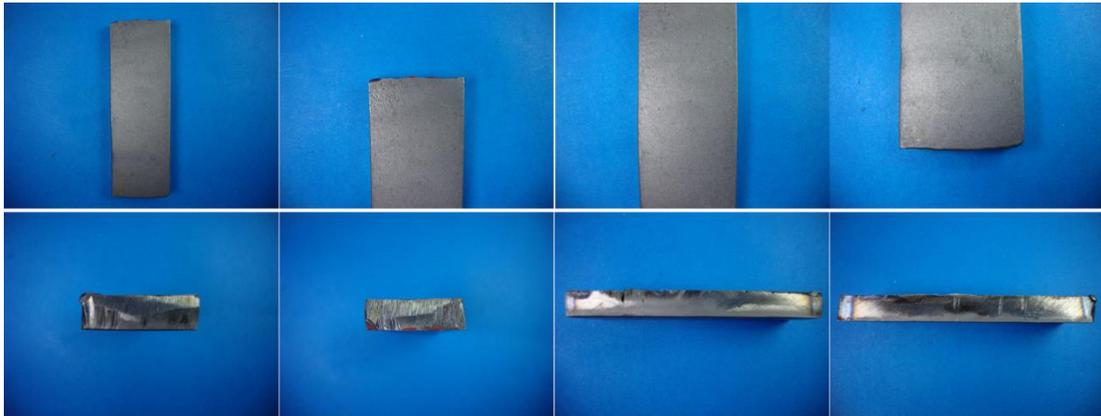
6 Termotratada. Oxidación superficial. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral severo por desgaste. Desgaste superficial homogéneo.



35 Termotratada. Rebordado lateral. Desgaste superficial homogéneo. Oxidación superficial.



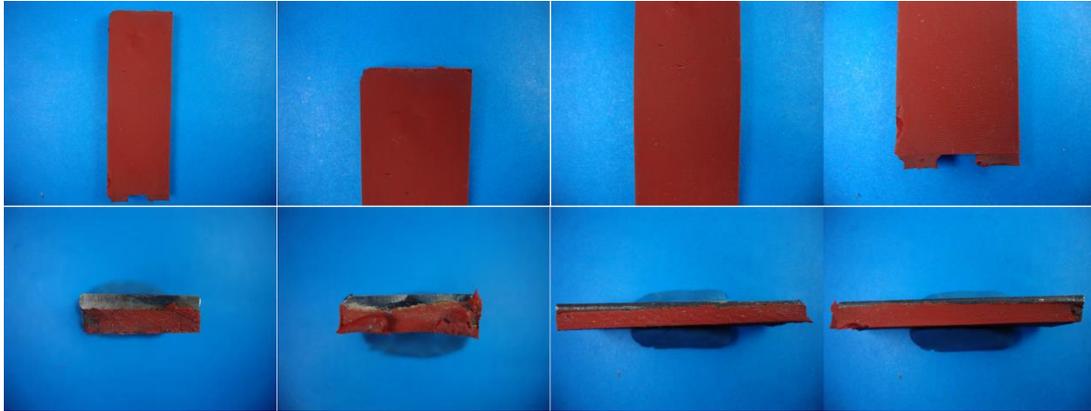
39 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta Desgaste superficial homogéneo. Reborde leve.



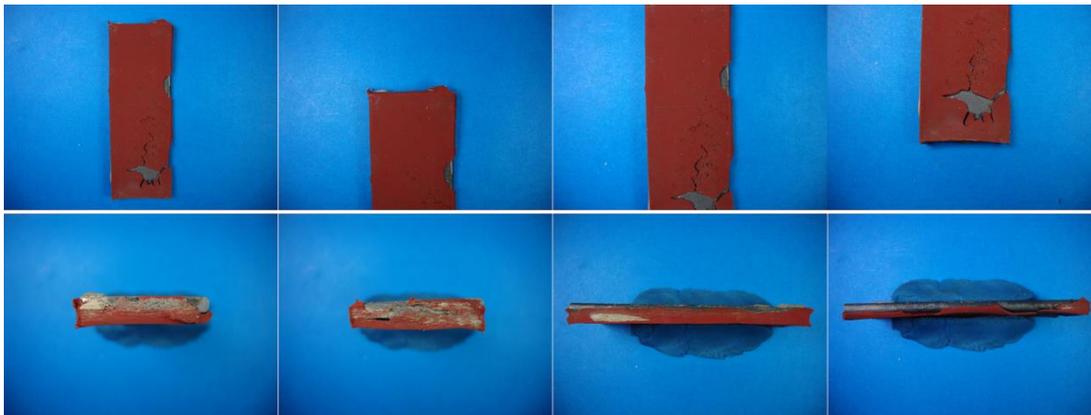
57 Termotratada. Reborde lateral. Desgaste superficial homogéneo. Temple homogéneo.



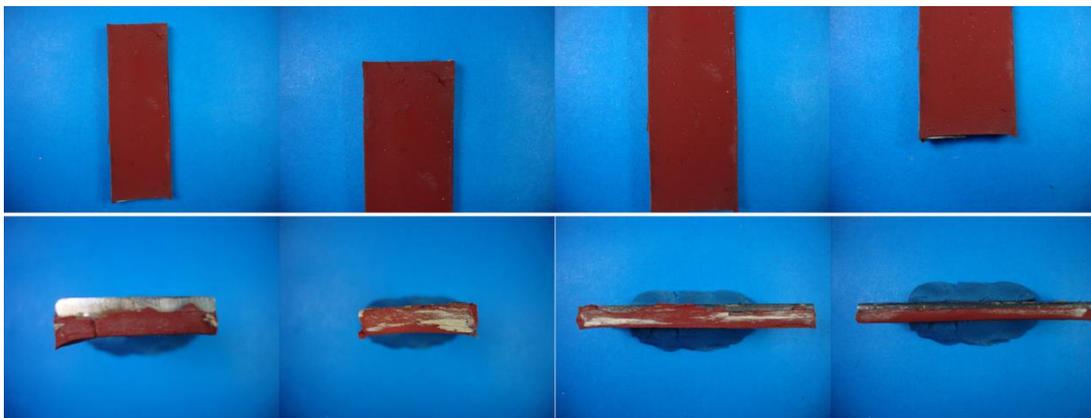
59 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta y reborde lateral por desgaste. Desgaste superficial homogéneo.



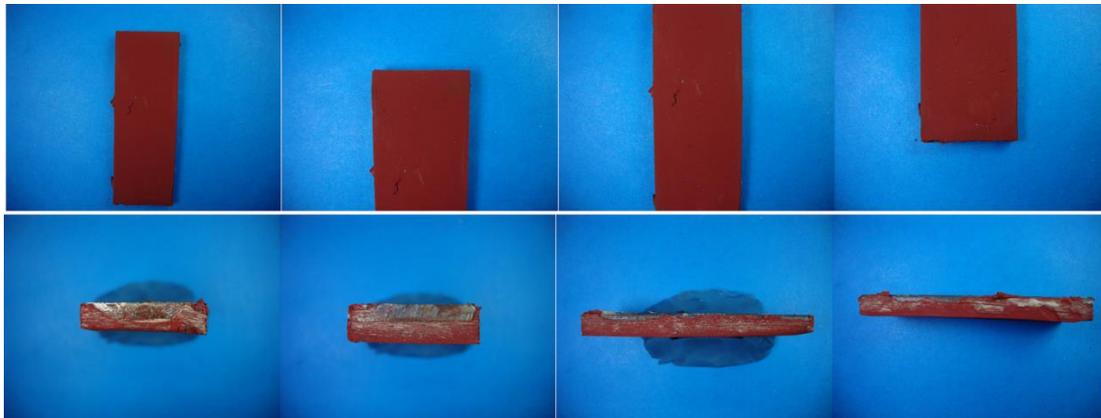
23 Polimérica. Desgaste superficial leve. Pérdida de material del 35%. Buena adherencia del recubrimiento sobre material base. Pequeños cortes aislados.



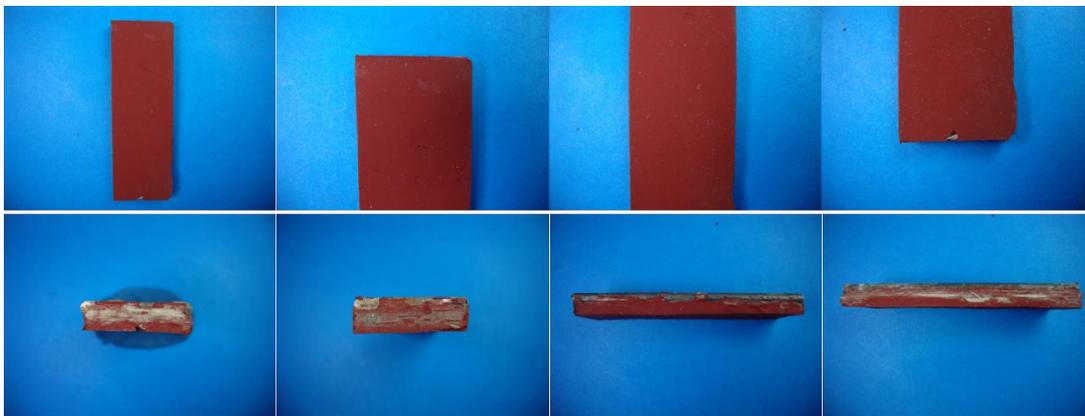
36 Polimérica. Desgaste superficial severo en dirección de flujo. Pérdida de material del 80%. Fisuración severa.



37 Polimérica. Desgaste superficial con pérdida de material del 50%. Buena adherencia del recubrimiento sobre material base. Cortes aislados y fisuración localizada.



48 Polimérica. Desgaste superficial leve con pérdida de material del 40%. Defectos superficiales localizados.



54 Polimérica. Desgaste superficial leve con pérdida de material del 25%. Defectos superficiales localizados.

GRUPO 8



13 Recubierta. Recubrimiento duro con altura heterogénea entre cordones. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro homogéneo por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones.



22 Recubierta. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos entre cordones. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



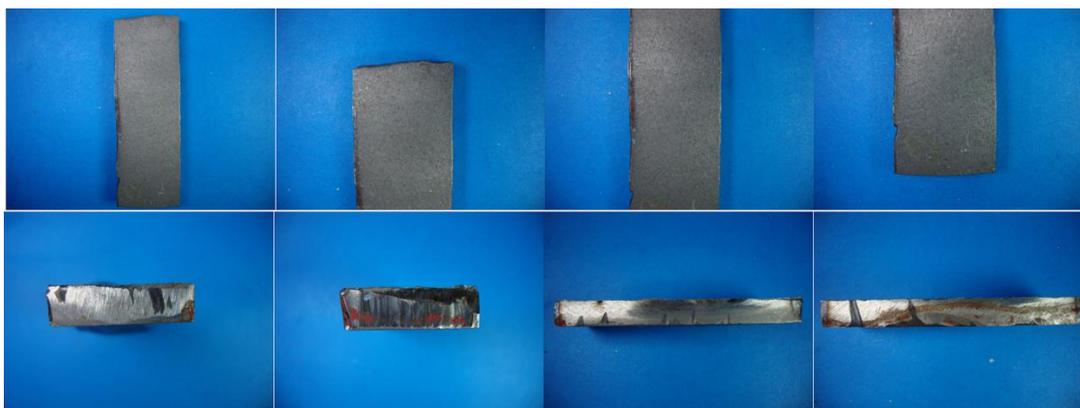
29 Recubierta. Bajo nivel de desgaste dado el mecanismo débil sobre los cordones contiguos. Fisuración transversal profunda propia del proceso de soldadura. Remoción material duro homogéneo por mecanismo de desgaste característico. Defectos severos entre cordones.



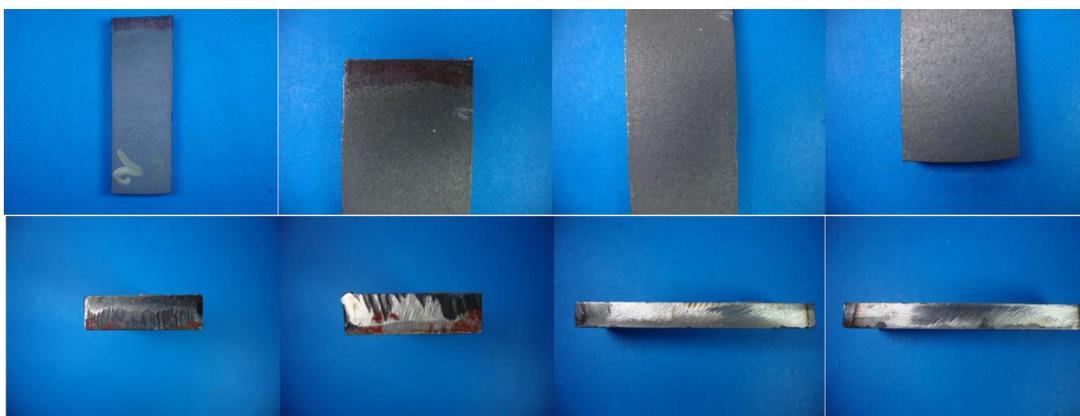
32 Recubierta. Bajo nivel de desgaste dada la apariencia del mecanismo débil sobre los cordones contiguos. Fisuración transversal leve. Defectos severos localizados entre cordones.



57 Recubierta. Fisuración transversal con fractura propia del proceso de soldadura. Remoción material duro por mecanismo de desgaste característico. Defectos severos entre cordones. Apariencia de menor daño superficial en zona de sucesión de cordones, por posible revenido de cordón anterior.



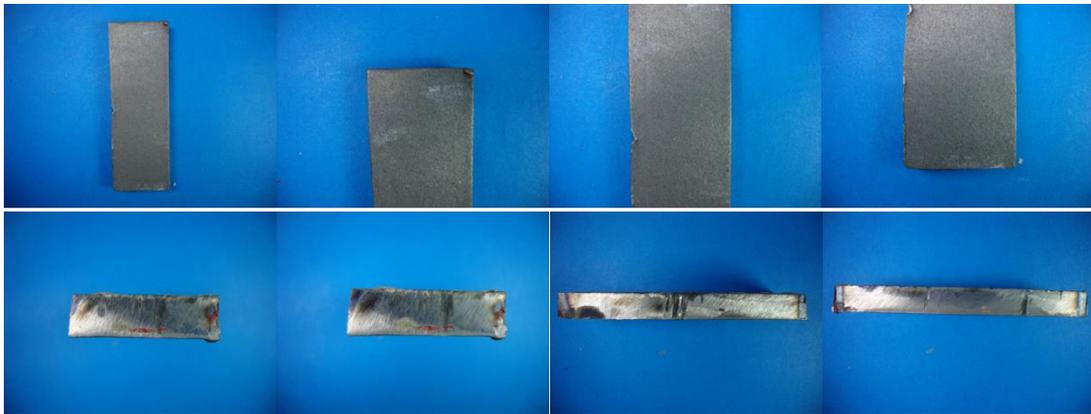
17 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta.



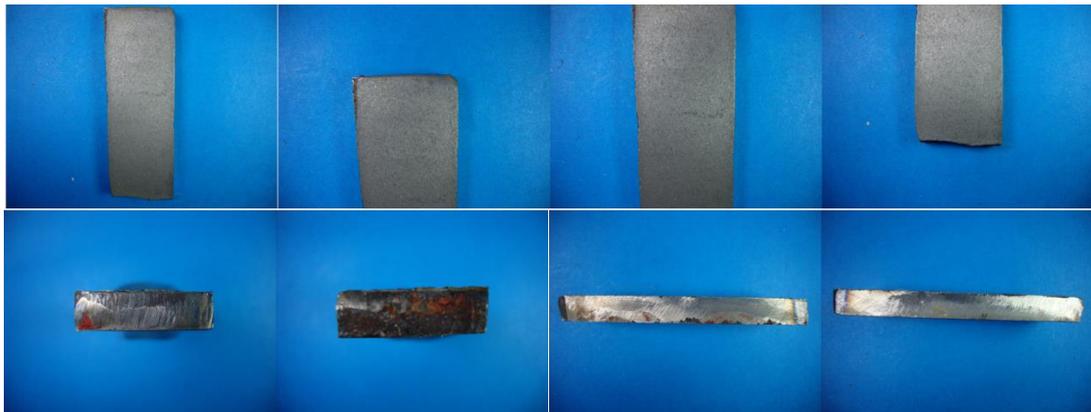
28 Termotratada. Borde protegido durante exposición al proceso de desgaste. Superficie de trabajo con desgaste uniforme.



40 Termotratada. Superficie de trabajo con desgaste uniforme. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta.



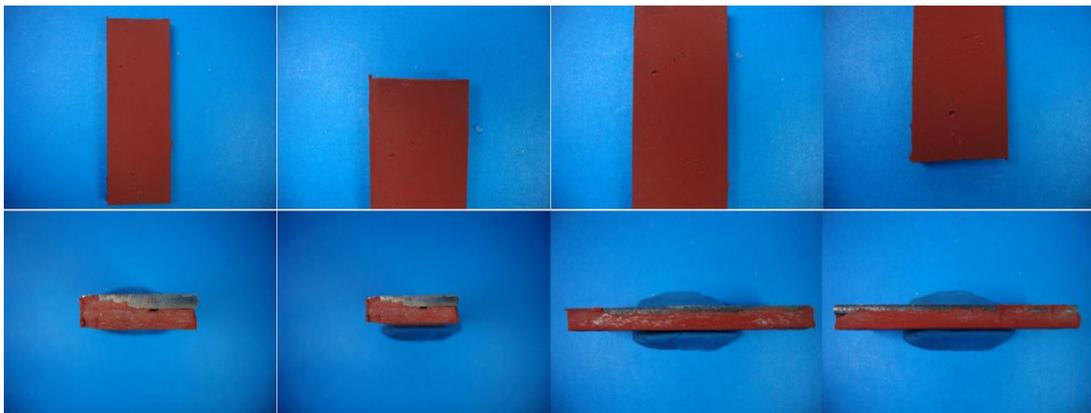
47 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Superficie de trabajo con desgaste uniforme.



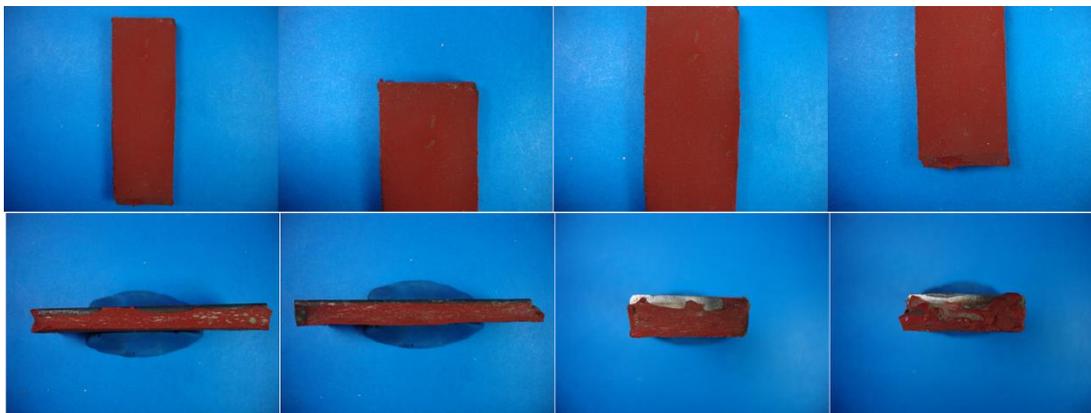
60 Termotratada. Imperfecciones laterales propias de la preparación de la probeta. Desgaste leve. No hay rebordes ocasionados por el flujo de material erosivo.



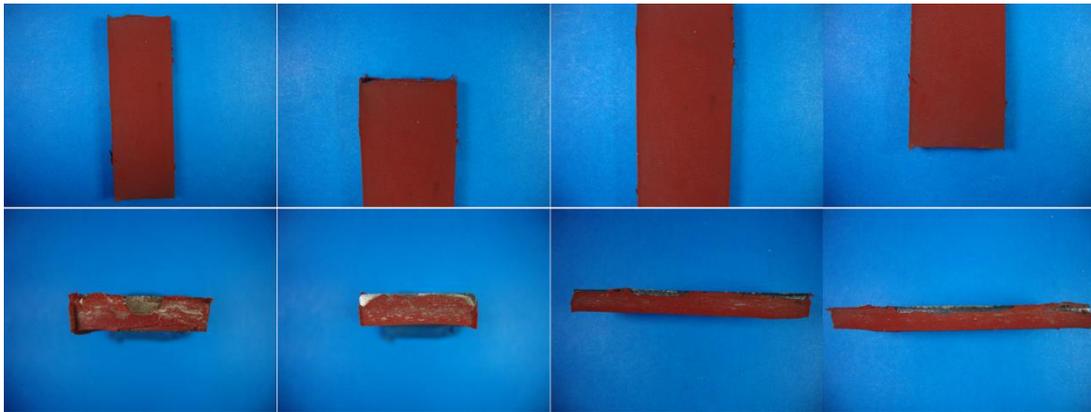
8 Polimérica. Desgaste superficial leve con pérdida de material del 25%. Pérdida de adherencia leve del recubrimiento sobre material base. Buena apariencia superficial.



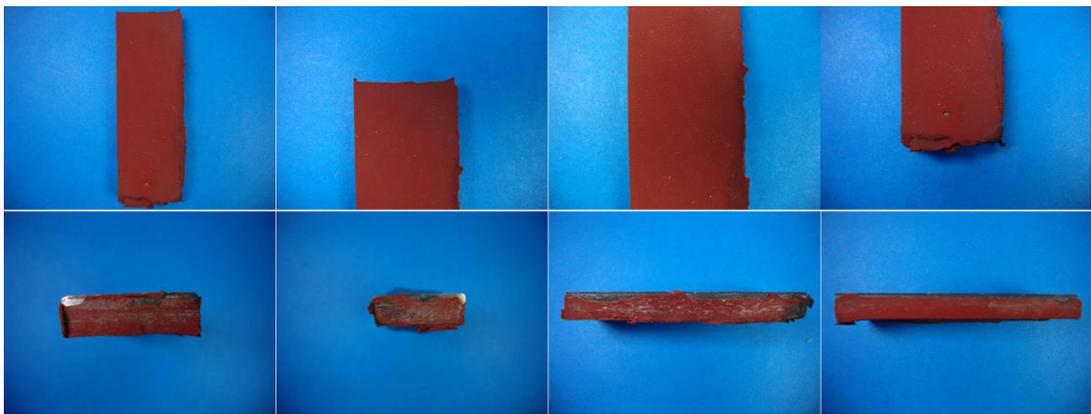
24 Polimérica. Desgaste superficial con pérdida de material del 30%. Defectos aislados.



51 Polimérica. Desgaste superficial con pérdida de material del 20%. Buena adherencia del recubrimiento sobre material base. Buena apariencia superficial.



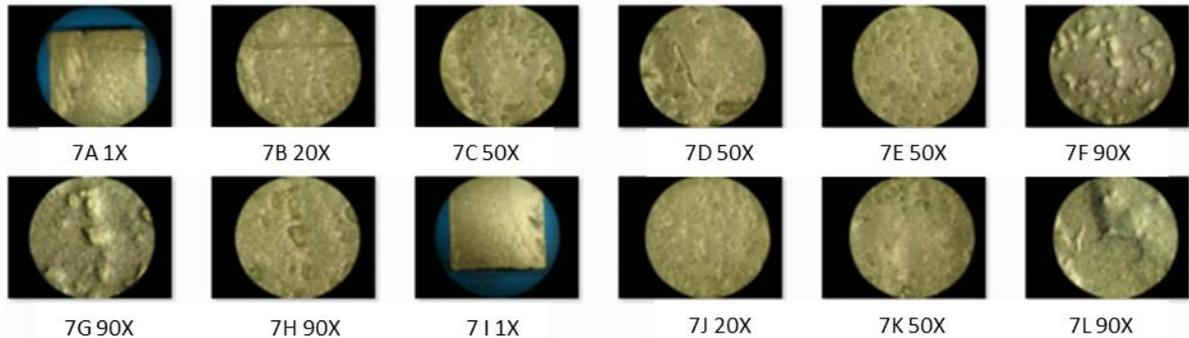
52 Polimérica. Desgaste superficial con pérdida de material del 40%. Buena adherencia del recubrimiento sobre material base. Buena apariencia superficial.



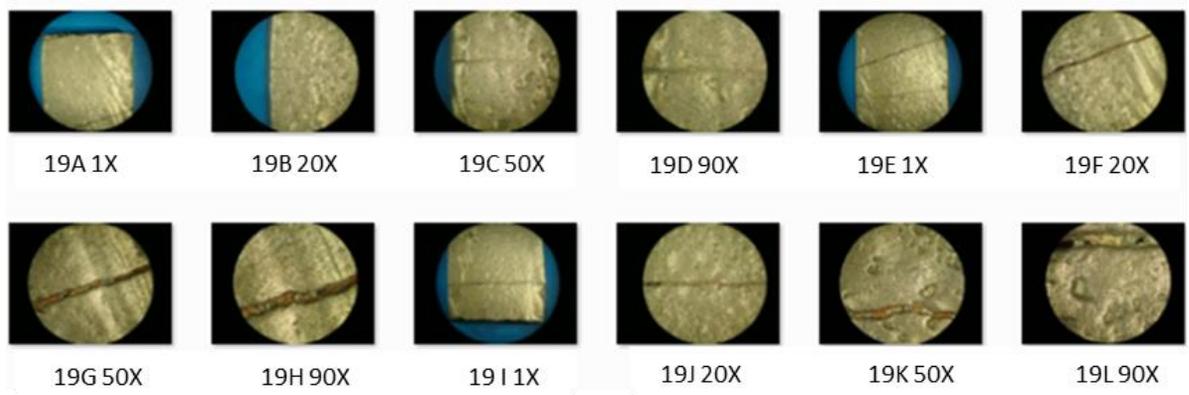
62 Polimérica. Baja pérdida de material cercano al 20%. Buena apariencia superficial.

ANEXO G: Fotografías de Análisis Estereoscópicas

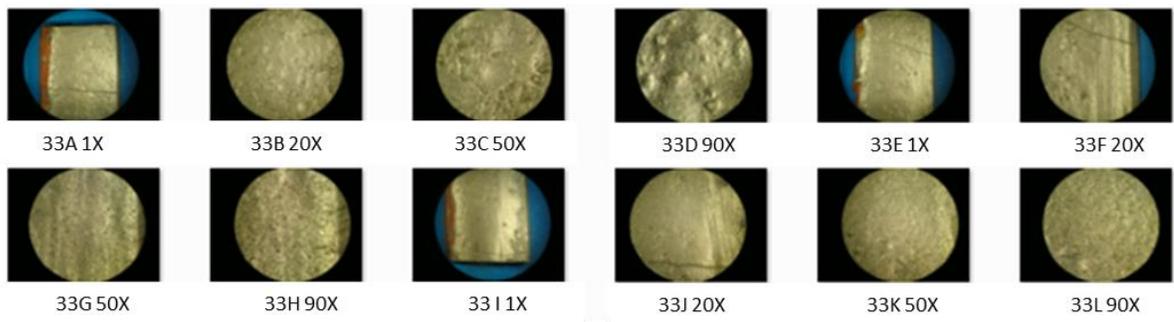
Grupo 1



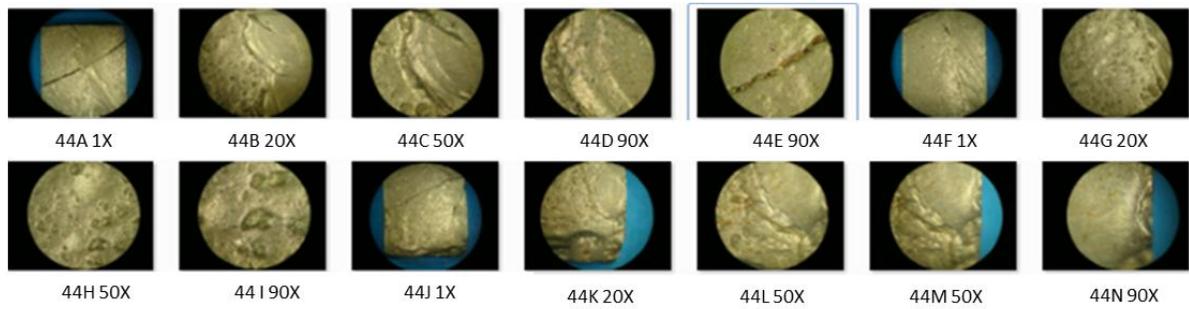
Probeta # 7 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifiesto por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie.



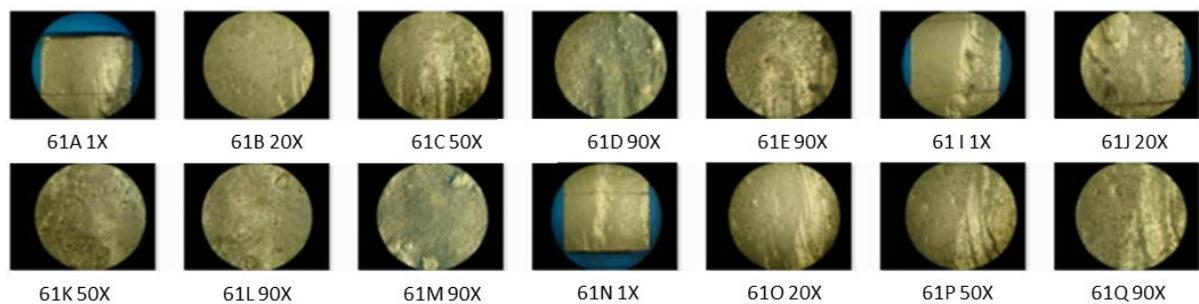
Probeta # 19 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifiesto por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



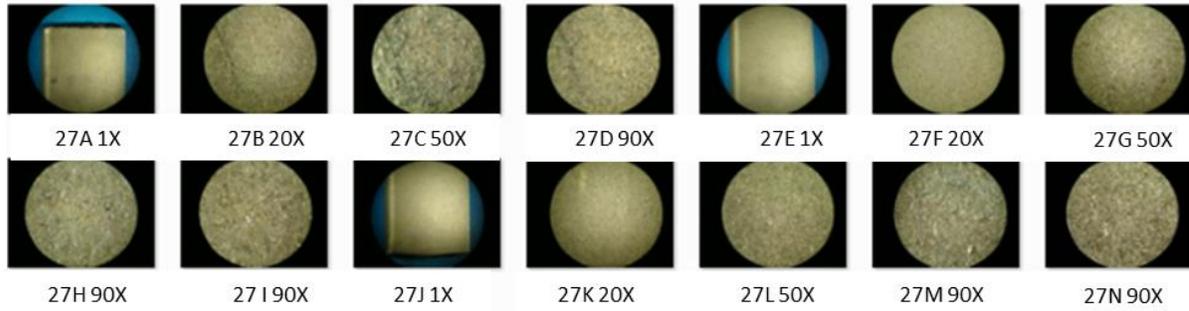
Probeta #33 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifestado por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



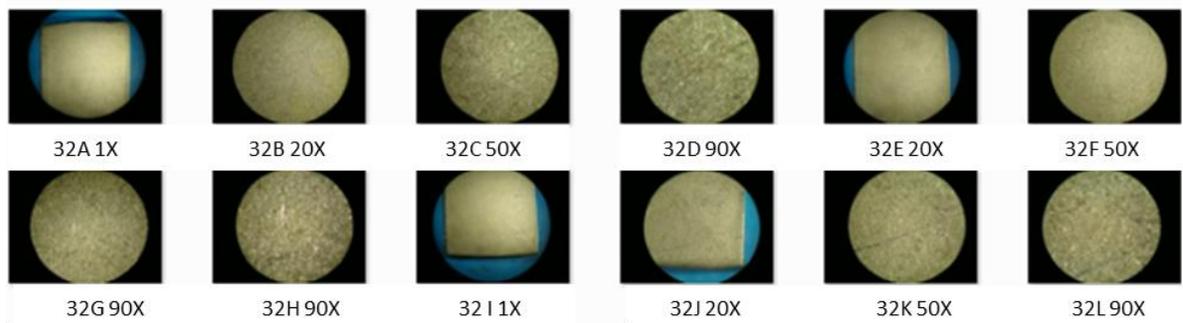
Probeta #44 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifestado por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



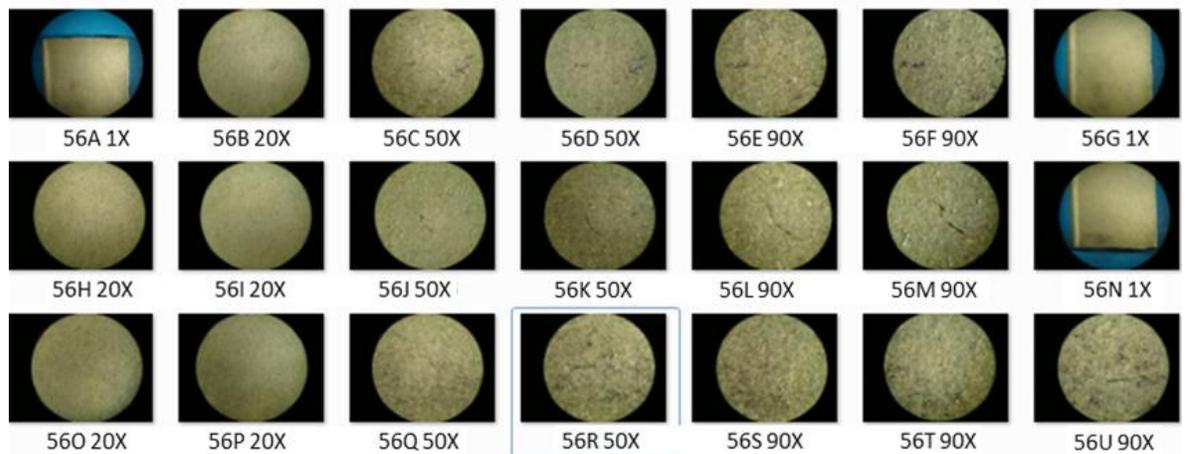
Probeta #61 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifestado por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



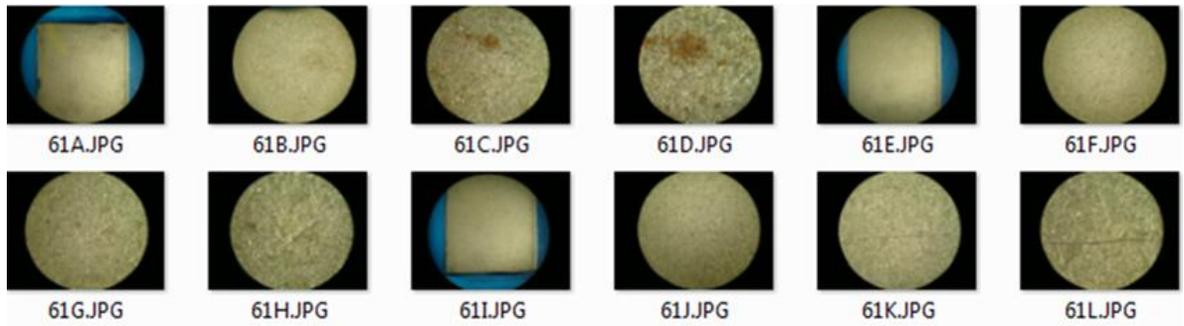
Probeta #27 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos (1x y 20X) se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro.



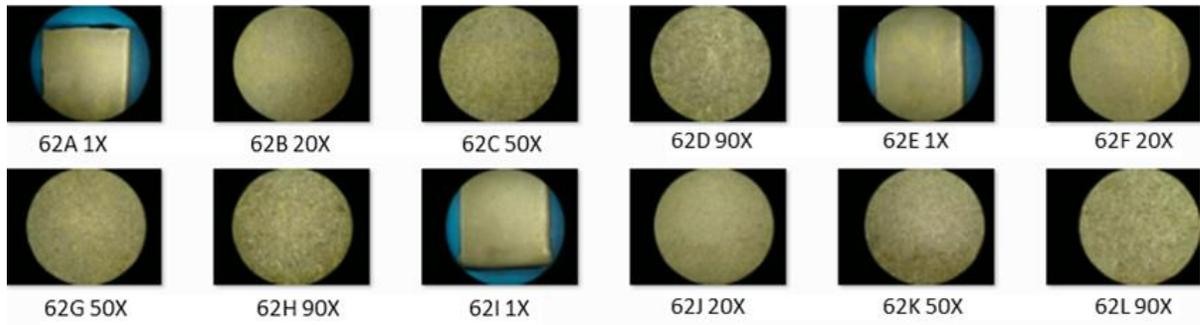
Probeta #32 Termotrada. Sin daño superficial aparente en las fotografías a bajos aumentos. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro, Adicionalmente se pueden observar marcas de arado severas.



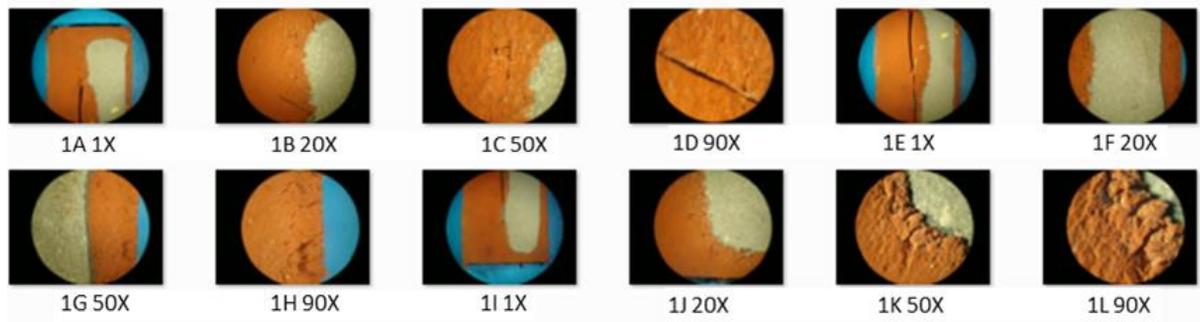
Probeta #56 Termotrada. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro, adicional a marcas de arado severas. Sin daño superficial aparente en las fotografías a bajos aumentos.



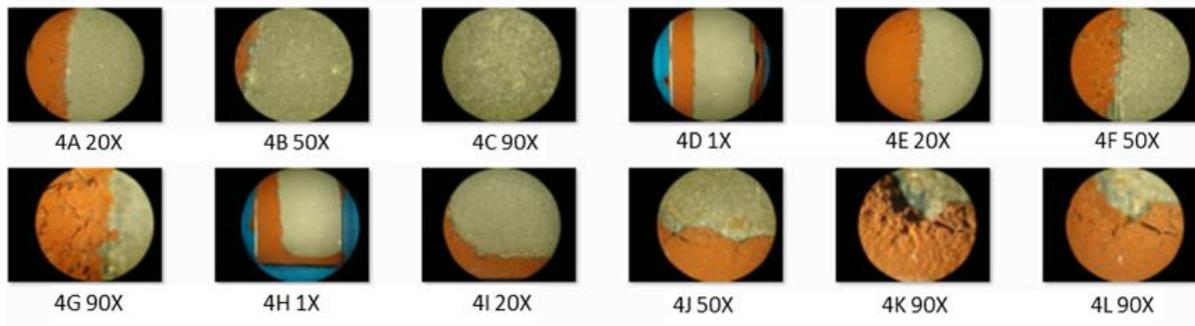
Probeta #61 Termotratada. Se observan trazas de óxido localizadas. Sin daño superficial aparente por impactos en las fotografías a bajos aumentos. A 50X y 90X se observa un relieve de superficie irregular y signos evidentes de deterioro.



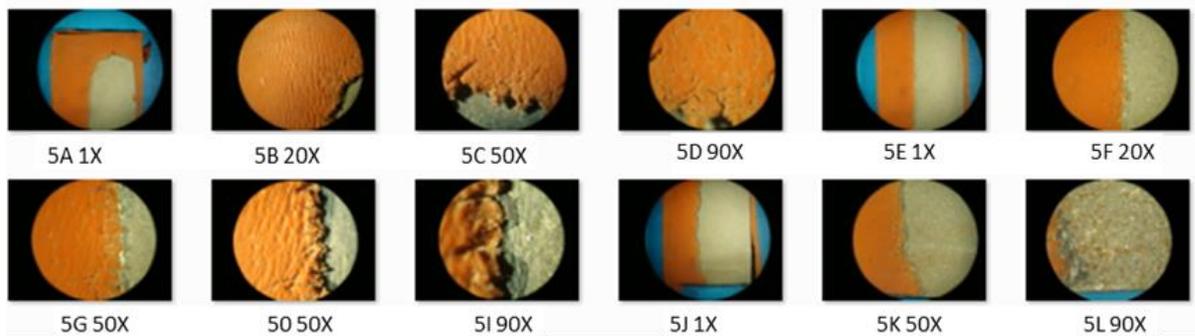
Probeta #62 Termotratada. No se aprecia daño superficial en las fotografías ni se evidencia ninguna particularidad de algún mecanismo de desgaste característico por erosión.



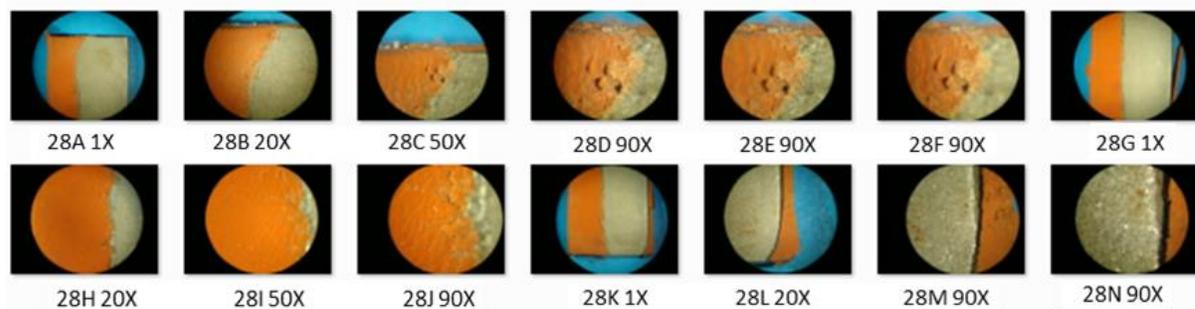
Probeta #1 Polimérica. Cortes superficiales severos, desgaste de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento. Deterioro marcado del material de recubrimiento.



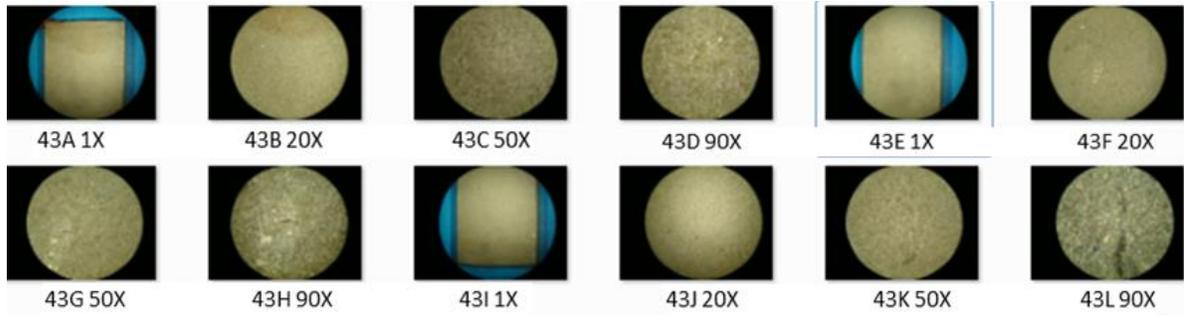
Probeta #4 Polimérica. Deterioro superficial severo, desgaste de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento. Se puede apreciar cómo se presenta la penetración de la fisura, la dirección del desprendimiento y pérdida de material.



Probeta #5 Polimérica. Se evidencia la dirección del flujo, perpendicular a las ondas que se ven sobre la superficie. Desgaste de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento. Se puede apreciar cómo se presenta la penetración de la fisura, la dirección del desprendimiento y pérdida de material.



Probeta #28 Polimérica. Pérdida de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento. Deterioro marcado del material de recubrimiento. Se observa que el avance de la pérdida de material tiene una dirección definida.

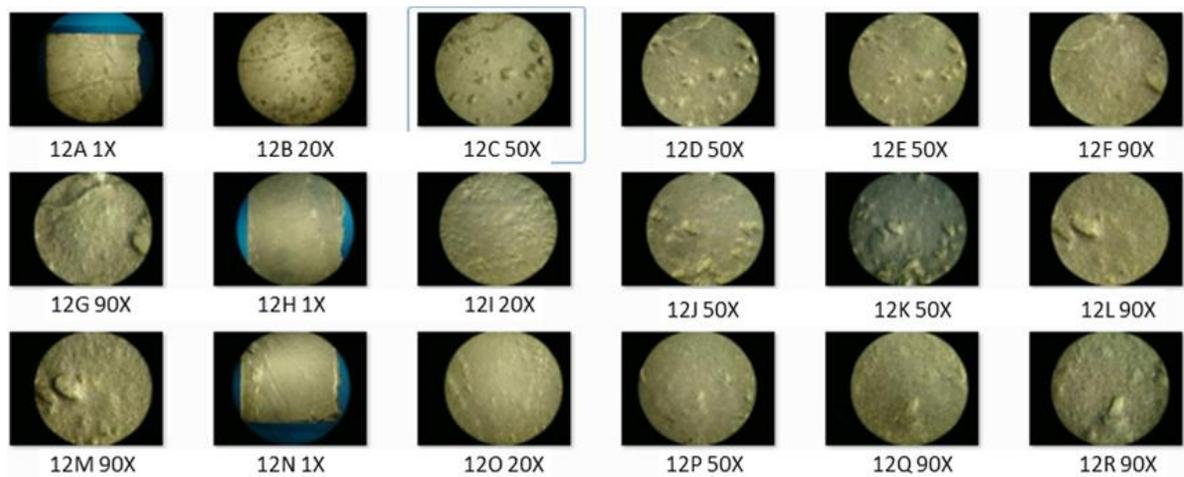


Probeta#43 Polimérica . Pérdida total del material de recubrimiento. A 90X se aprecia la degradación del material base a partir de huellas de arado severas sobre la superficie.

GRUPO 2

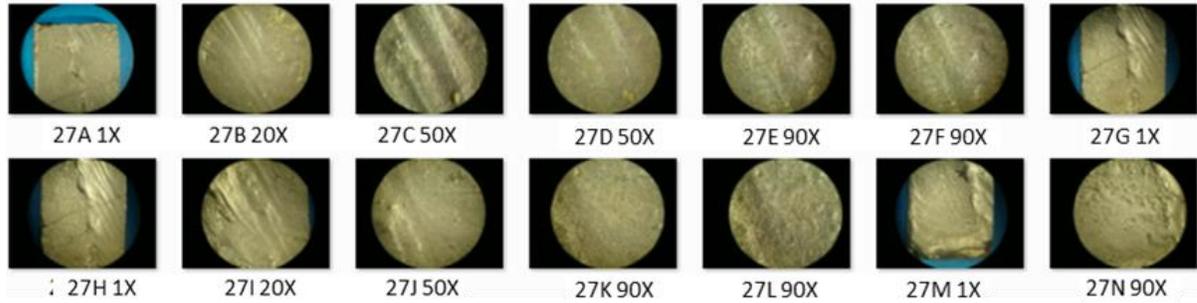


Probeta #14 Recubierta. Se aprecia daño superficial manifiesto por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa. Fisuras a lo ancho de la probeta características del recubrimiento.

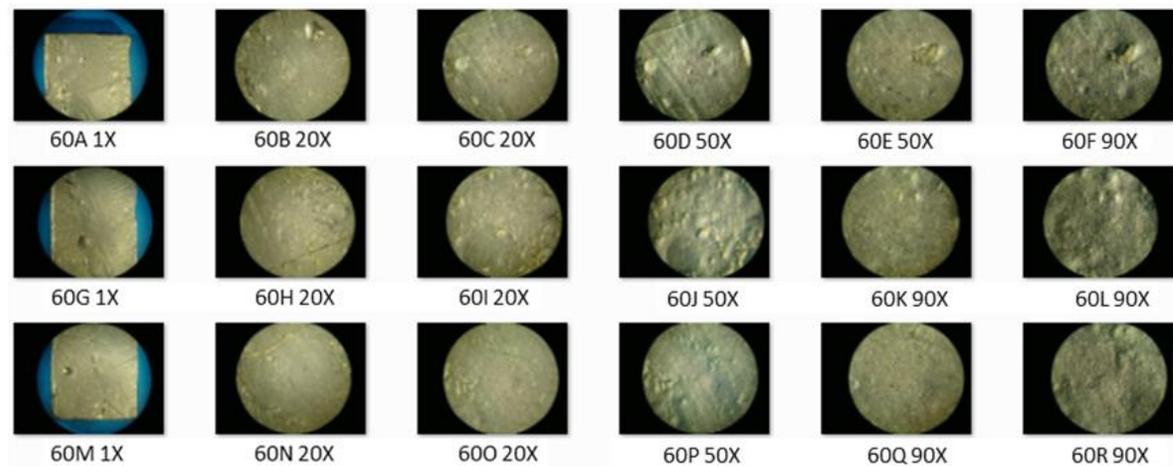


Probeta #12 Recubierta. Se aprecia daño superficial manifiesto por socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó

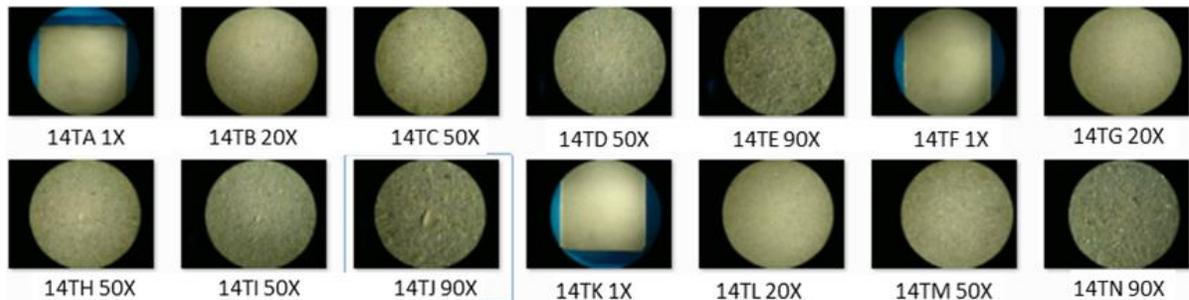
deformación plástica severa. Fisuras a lo ancho de la probeta características del recubrimiento. Se evidencian las fronteras de los cordones adyacentes del recubrimiento.



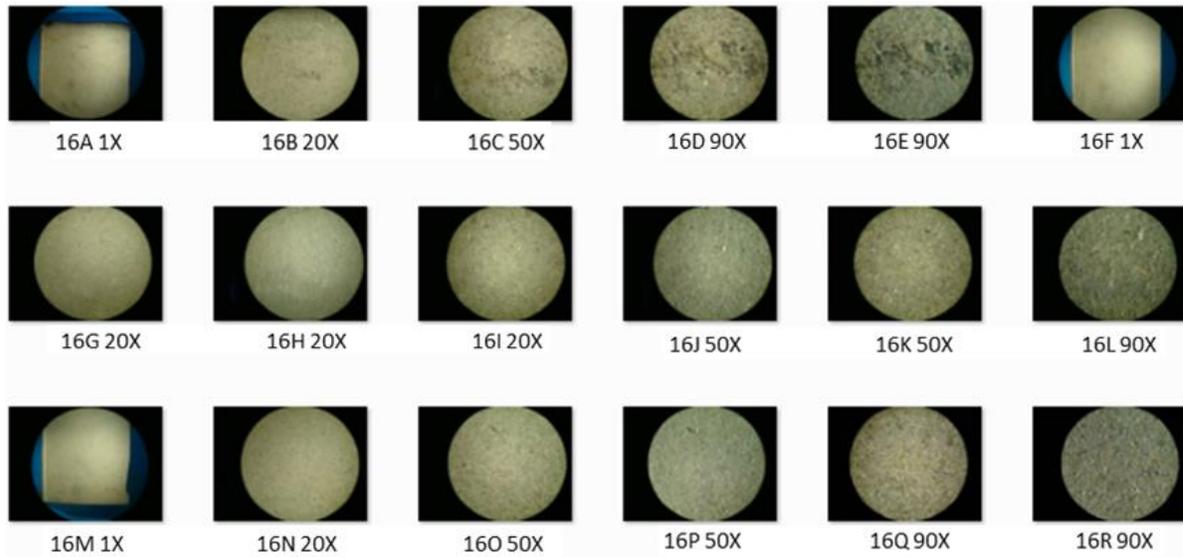
Probeta #27 Recubierta. Se evidencian las fronteras de los cordones adyacentes del recubrimiento, defectos en el proceso de depósito de la soldadura. Se aprecia daño superficial leve con pocas socavaciones en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



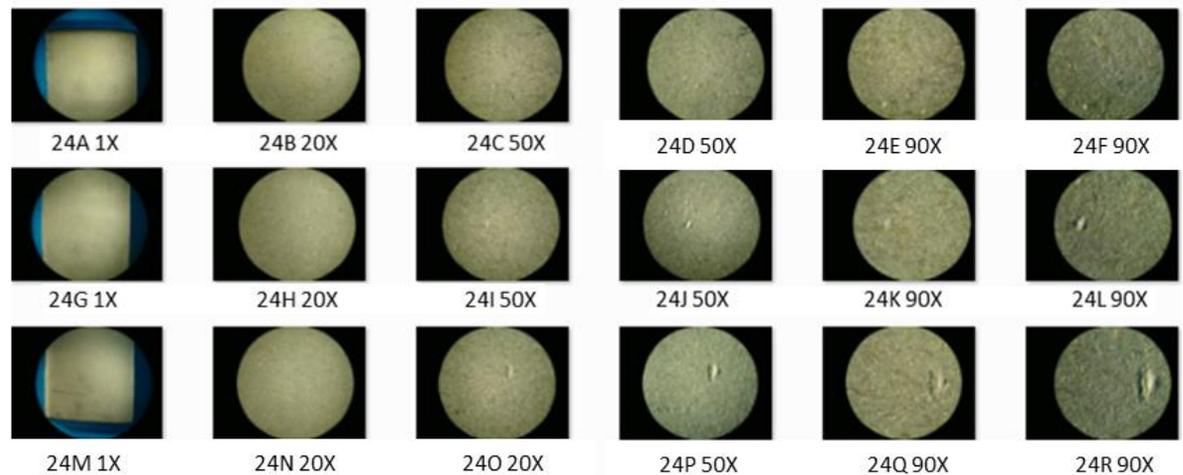
Probeta #60 Recubierta. Se evidencian las fronteras de los cordones adyacentes del recubrimiento, defectos en el proceso de depósito de la soldadura. Se aprecia daño superficial manifiesto con socavaciones en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



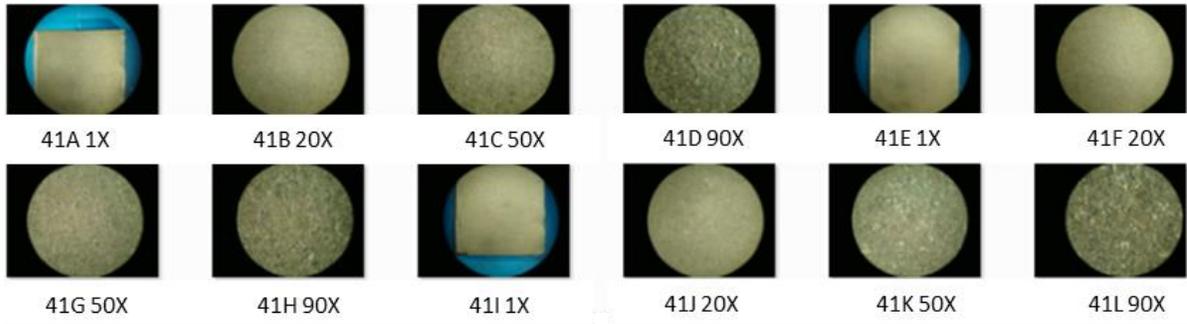
Probeta #14 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos (1x y 20X) se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas.



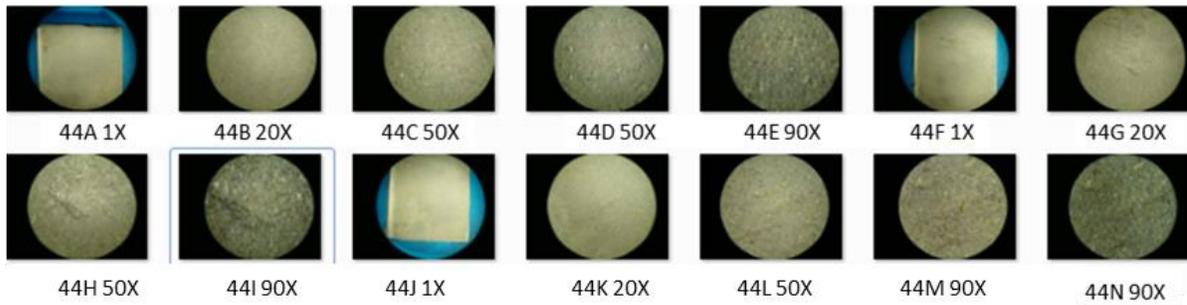
Probeta #16 Termotratada. Superficie con indicios de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



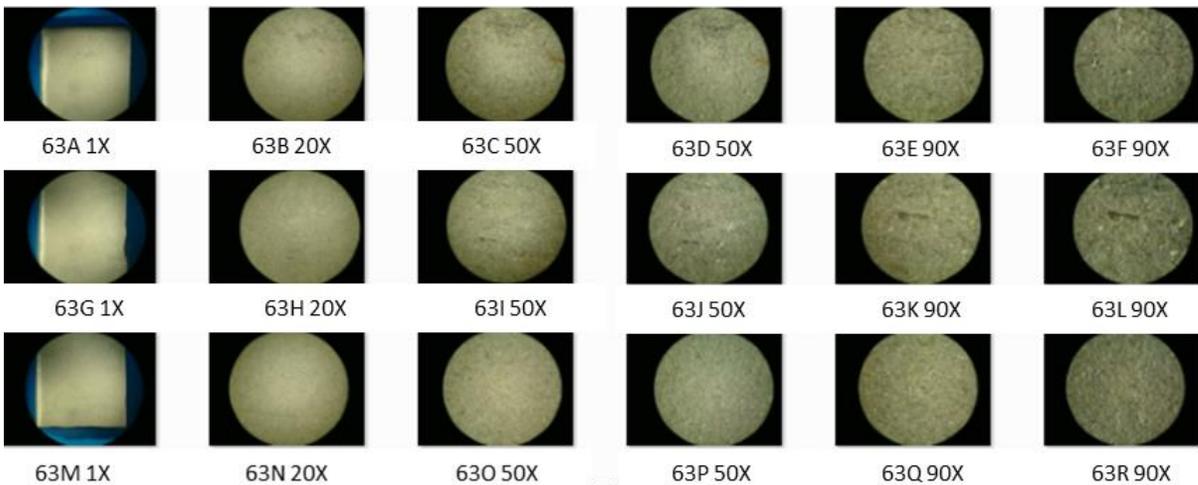
Probeta #24 Termotratada. Superficie con indicios de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



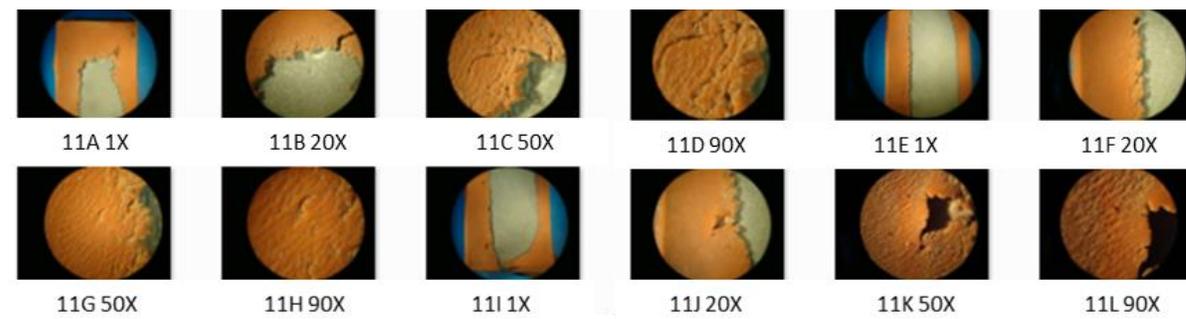
Probeta #41 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro.



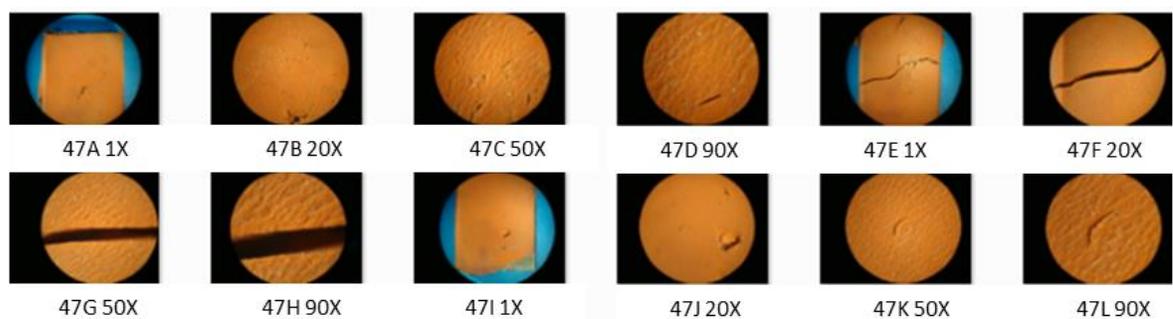
Probeta #44 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 50X y 90X.



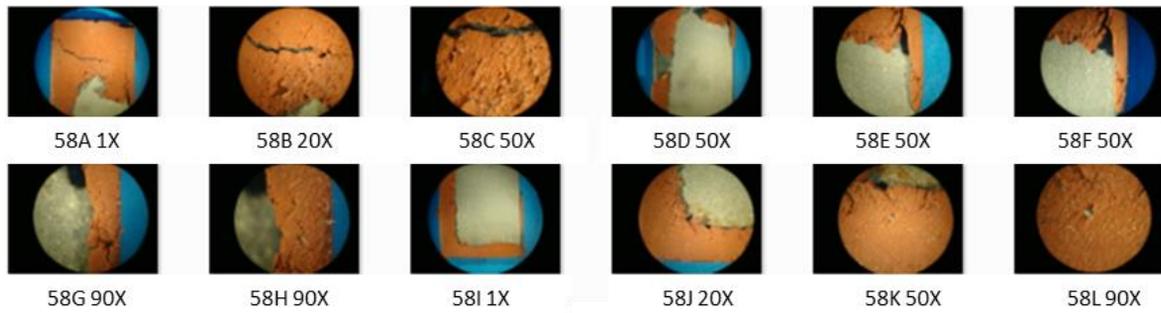
Probeta #63 Termotrada. Superficie con indicios de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular, con marcas de arado y de indentación manifiestas a 50X y 90X.



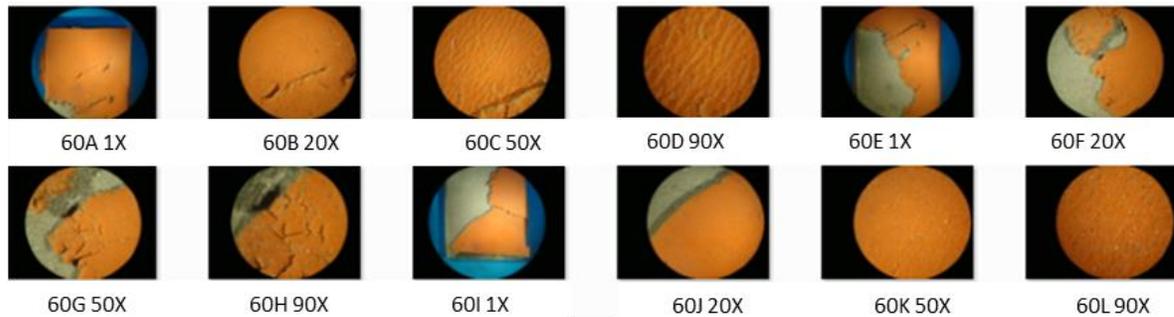
Probeta #11 Polimérica. A la 1X se aprecia la huella de material removido que indica la dirección del desprendimiento y la pérdida de material, el cual no es uniforme sino que se va presentando desde el centro de la probeta hacia sus extremos indicando que el flujo de las partículas erosivas es oblicuo. A los 20X, 50X y 90X se evidencia la dirección del flujo, perpendicular a las ondas que se ven sobre la superficie. Se observa un daño severo de la superficie expuesta con cortes profundos y desgaste de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento.



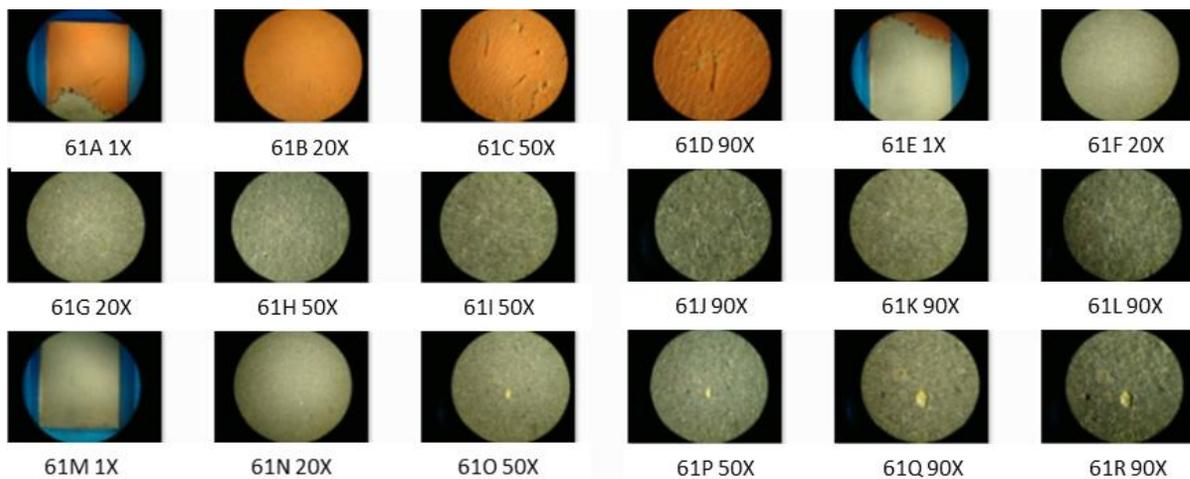
Probeta #47 Polimérica. Se aprecia un reborde que indica un bajo ángulo de incidencia. A los 20X, 50X y 90X se evidencia la dirección del flujo, perpendicular a las ondas que se ven sobre la superficie, se observa un proceso de erosión no muy agresivo, aunque se aprecian cortes profundos y desgaste de un bajo porcentaje de material polimérico de recubrimiento.



Probeta 58 Polimérica. A la 1X se aprecia la huella de material removido que indica la dirección del desprendimiento y la pérdida de material, el cual no es uniforme sino que se va presentando desde el centro de la probeta hacia sus extremos indicando que el flujo de las partículas erosivas es oblicuo. A los 20X, 50X y 90X puede evidenciarse un daño superficial severo, desgaste de un alto porcentaje de material polimérico de recubrimiento debido a la interconexión entre fisuras, la penetración de la misma y la dirección del desprendimiento y pérdida de material.

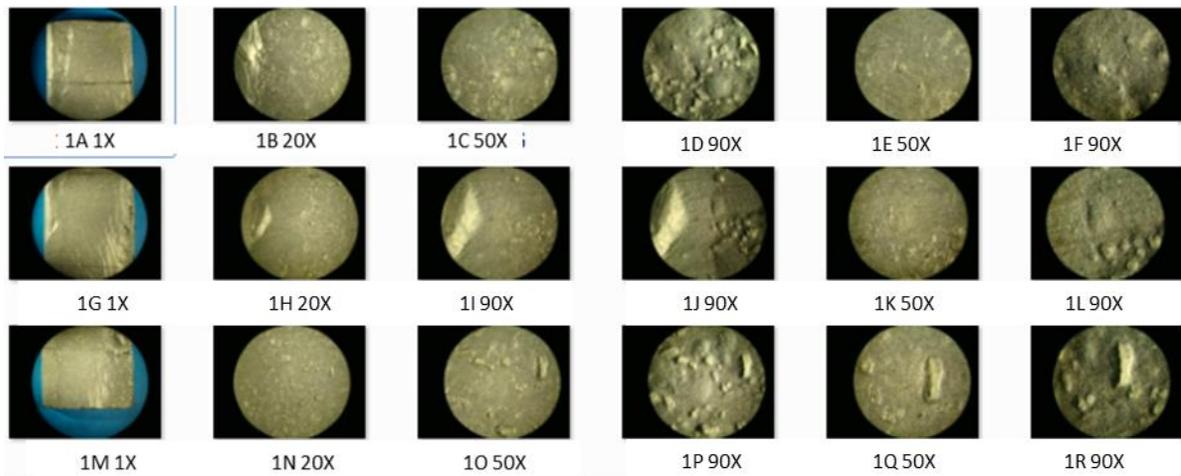


Probeta #60 Polimérica. En las fotografías puede apreciarse el proceso del mecanismo de desgaste, el cual inicia con una fisuración superficial perpendicular a la dirección del flujo, penetración e interconexión de las fisuras, la penetración de la misma y la consecuente pérdida de material.

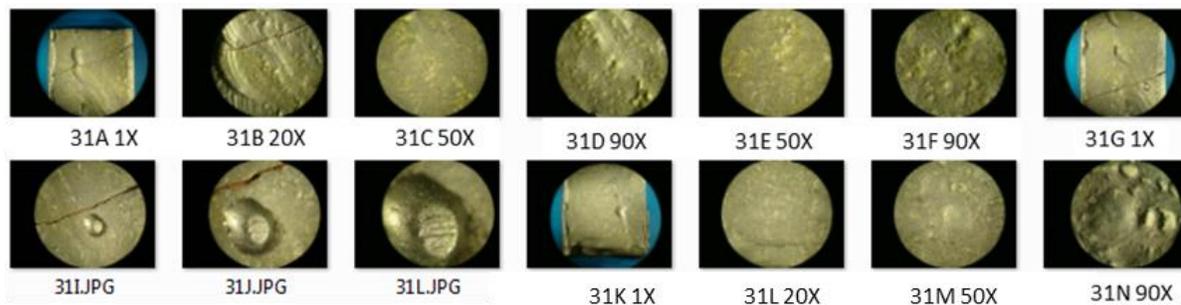


Probeta #61 Polimérica. La dirección del avance del mecanismo de desgaste es desde el extremo inferior hacia el superior, la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Zonas con pérdida total del material de recubrimiento. A 90X se aprecia la degradación del material base a partir de huellas de arado sobre la superficie.

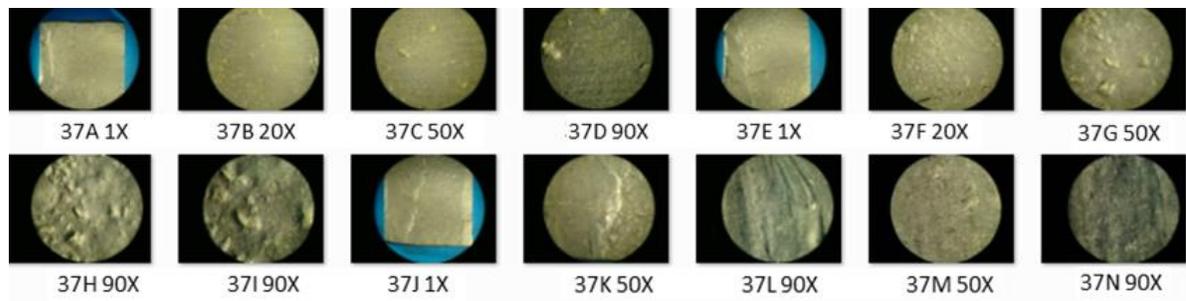
GRUPO 3



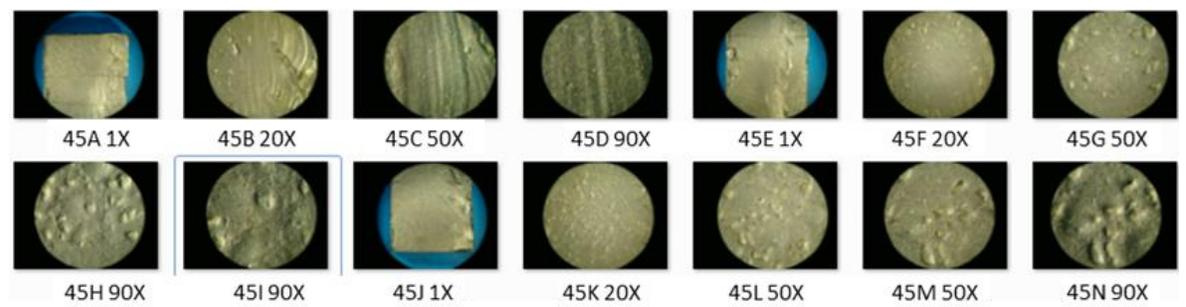
Probeta #1 Recubierta. Se aprecia fisuración severa localizada, daño superficial manifiesto por socavaciones irregulares y grandes en zonas específicas de la superficie. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



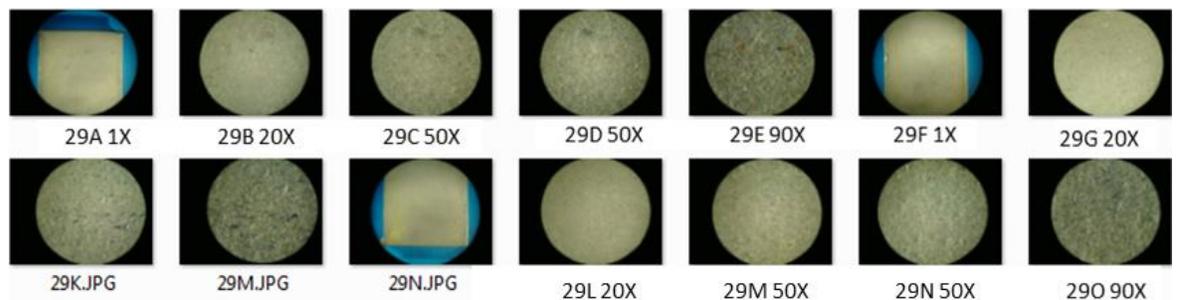
Probeta #31 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los cordones adyacentes. Fisuración severa localizada y socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



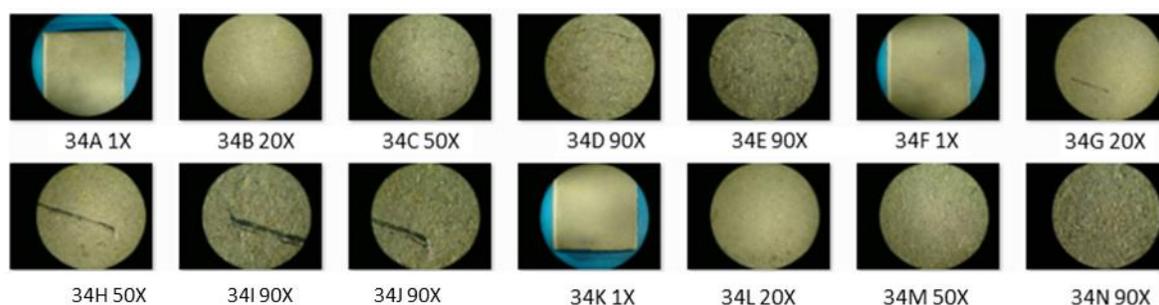
Probeta #37 Recubierta. Defectos en el depósito del recubrimiento en general y en los cordones adyacentes. Daño superficial en pequeñas zonas específicas que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo manifiesto por socavaciones puntuales. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



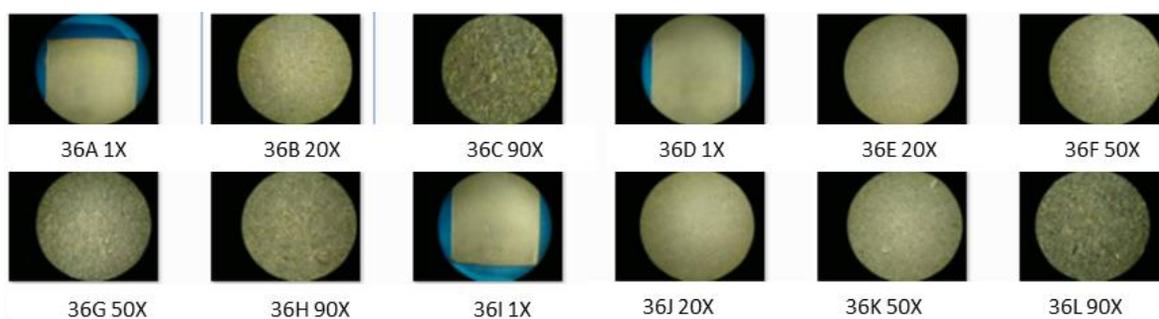
Probeta #45 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los cordones adyacentes. Fisuración localizada propias del proceso de soldadura y socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



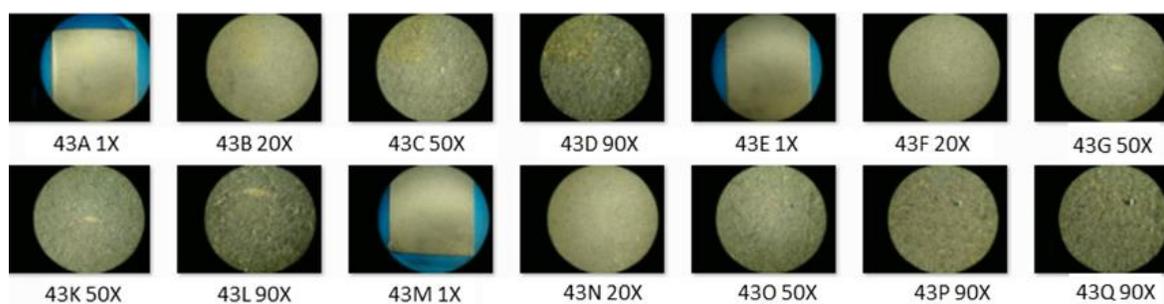
Probeta #29 Termotrada. Superficie con indicios de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



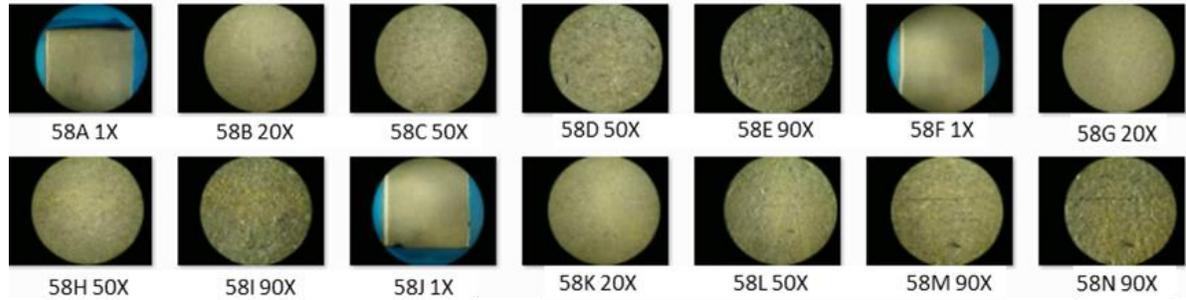
Probeta #34 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme con algunas marcas de arado. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular, con signos evidentes de deterioro, marcas de arado y algunas marcas de indentación manifiestas a los 50X y 90X.



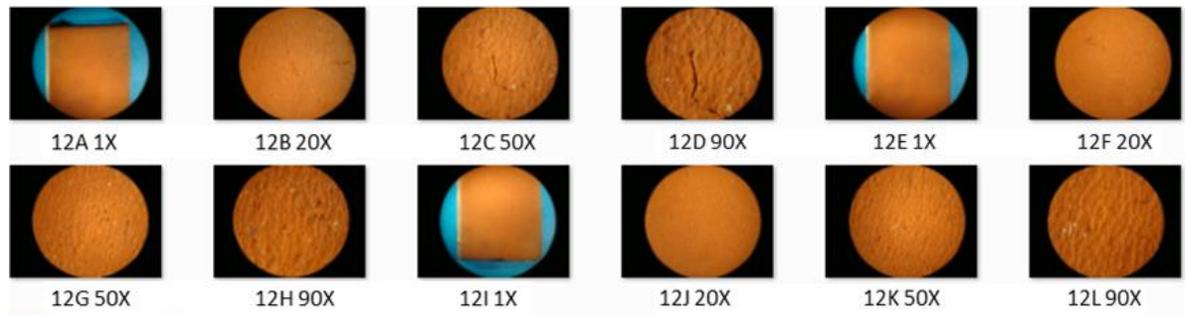
Probeta #36 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



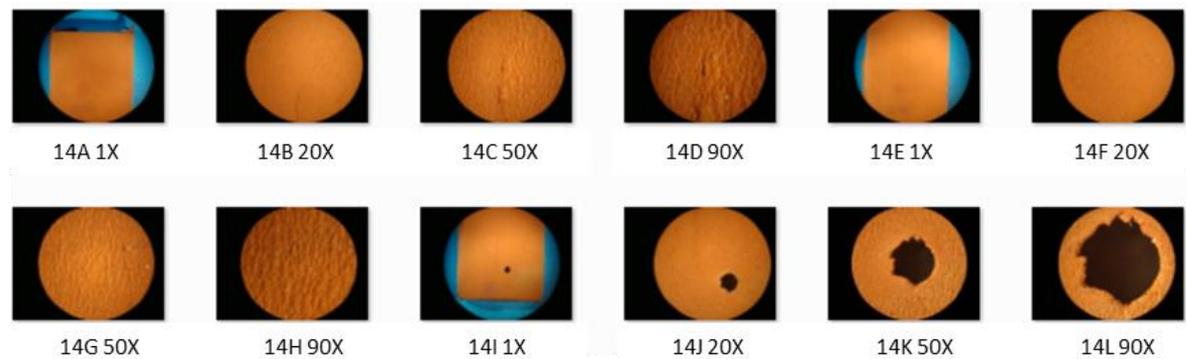
Probeta #43 Termotrada. Superficie con indicios de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



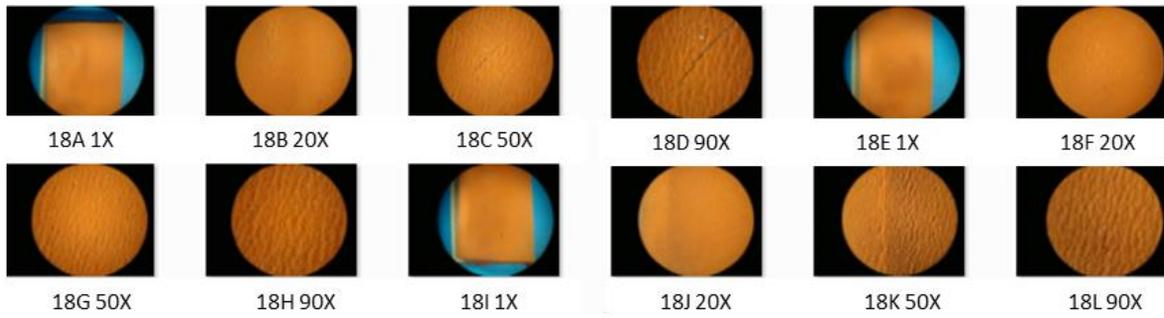
Probeta #58 Termotrada. Sin daño superficial aparente por erosión en las fotografías a bajos aumentos. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos evidentes de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 50X y 90X.



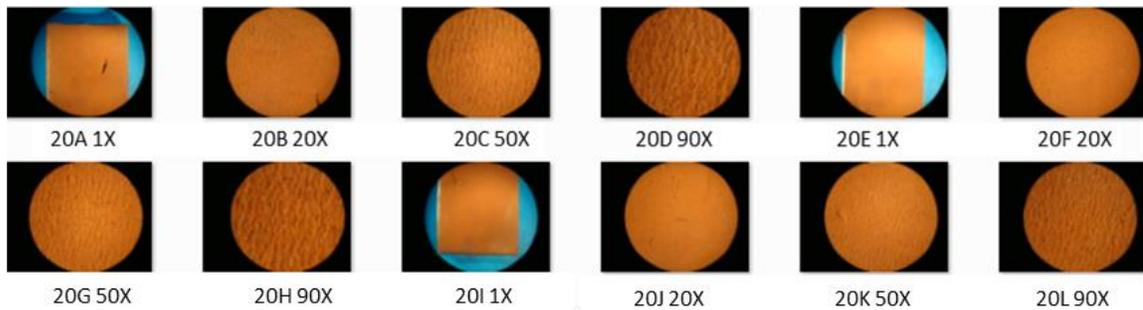
Probeta #12 Polimérica. A 1X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste no es severo. A los 50X y 90X puede evidenciarse un daño superficial leve, fisuración superficial incipiente.



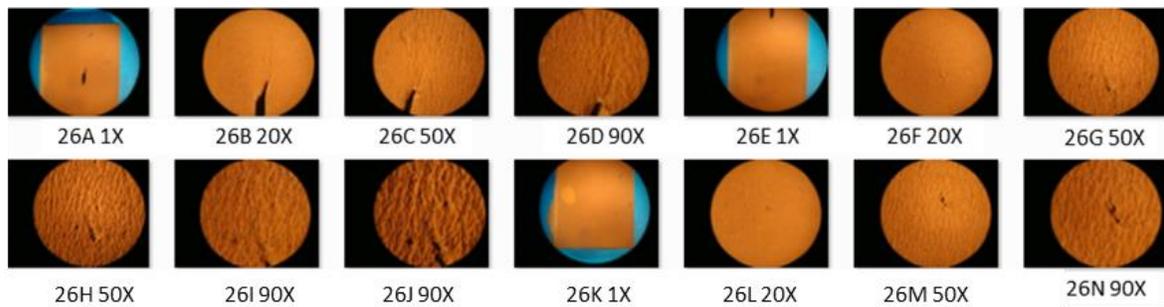
Probeta #14 Polimérica. Se observa un orificio que no corresponde con un mecanismo de desgaste particular sino que puede atribuirse a una burbuja de aire contenida durante el proceso de recubrimiento de la probeta. A 1X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve. A los 50X y 90X puede evidenciarse un proceso de fisuración superficial incipiente.



Probeta #18 Polimérica. A 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse un daño superficial leve, con fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

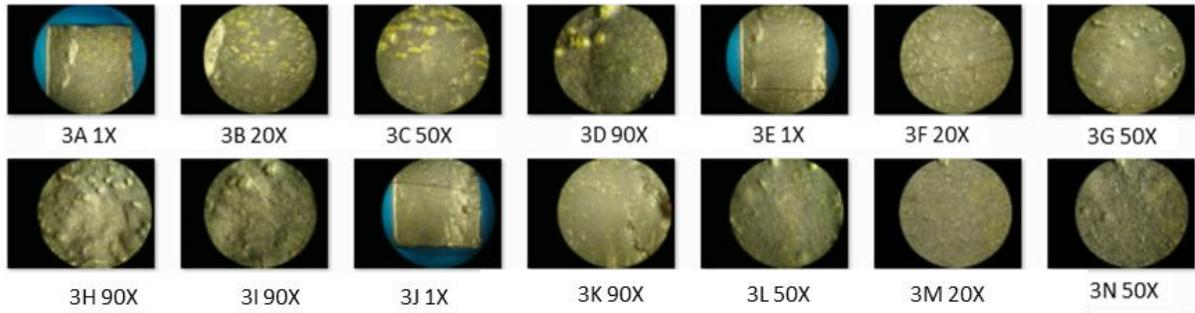


Probeta #20 Polimérica. A 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse un daño superficial leve, con fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

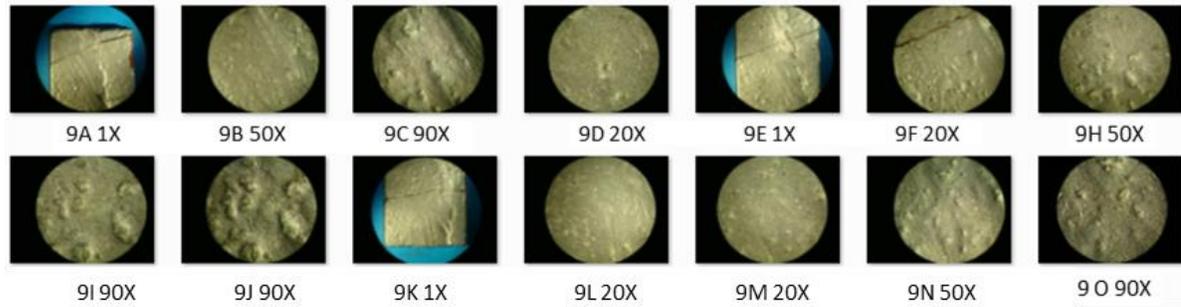


Probeta #26 Polimérica. A 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse un daño superficial leve, con fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

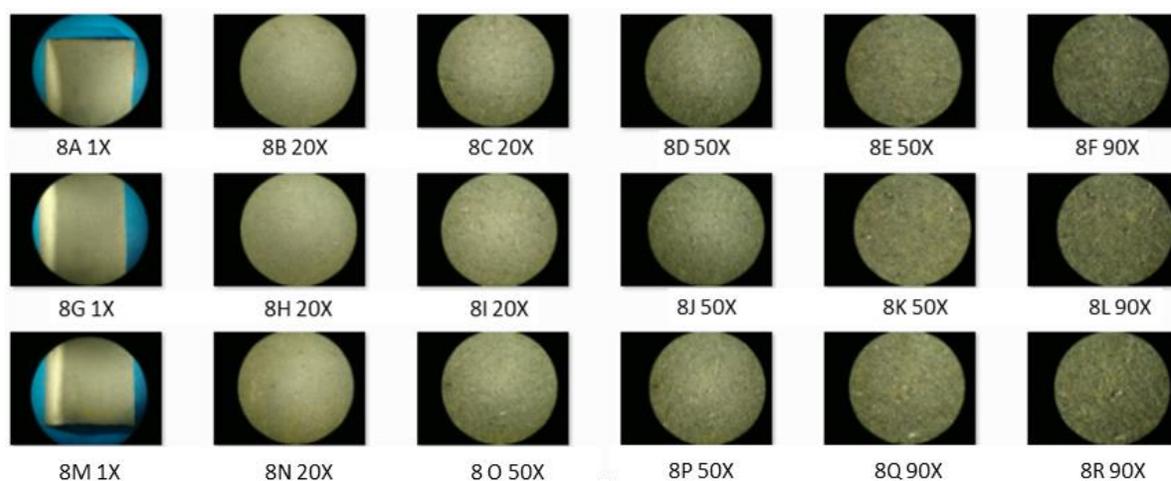
GRUPO 4



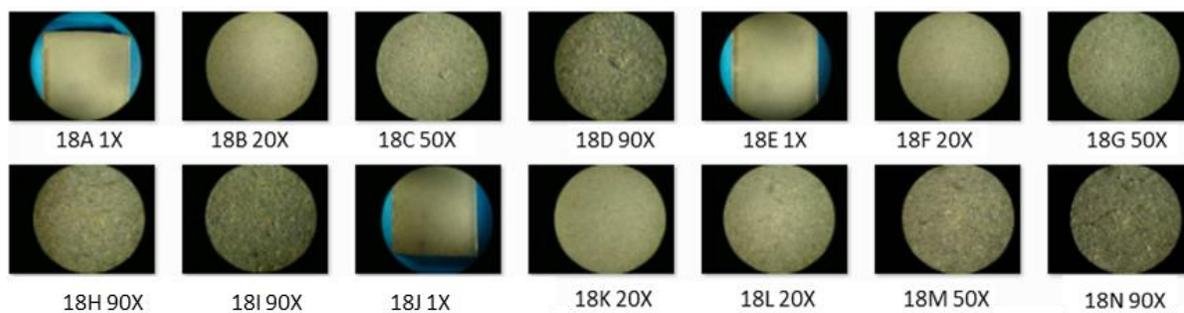
Probeta #3 Recubierta. Fisuración localizada propia del proceso de soldadura y pocas socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y entre los cordones adyacentes. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



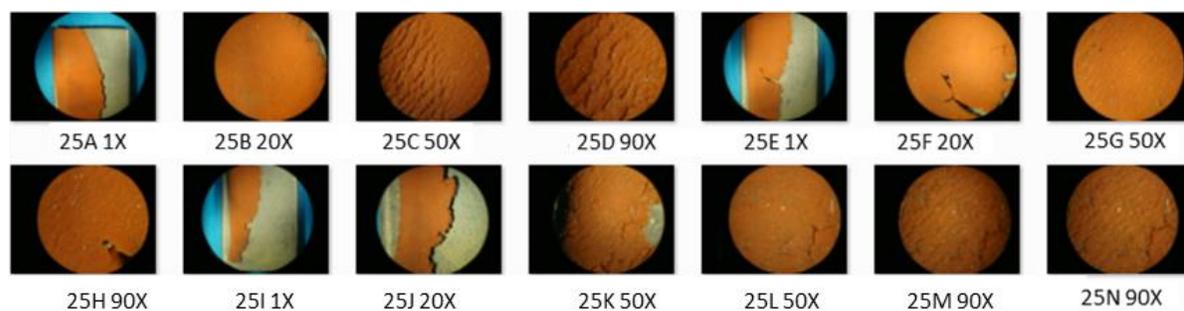
Probeta #9 Recubierta. . Fisuración localizada propia del proceso de soldadura con socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



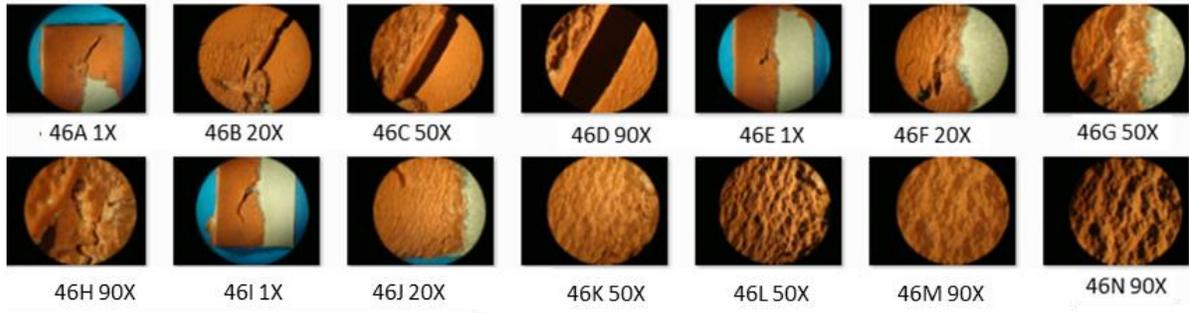
Probeta # 8 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos 1X y 20X, se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de indentación manifiestas a los 90X.



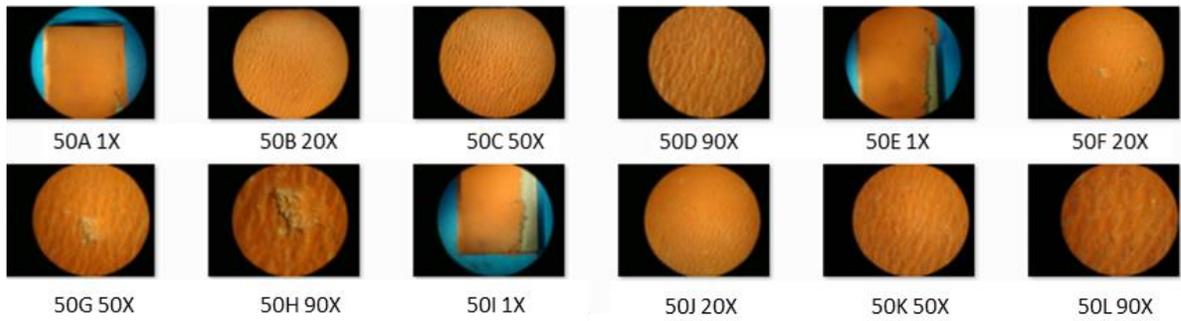
Probeta #18 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas a los 90X.



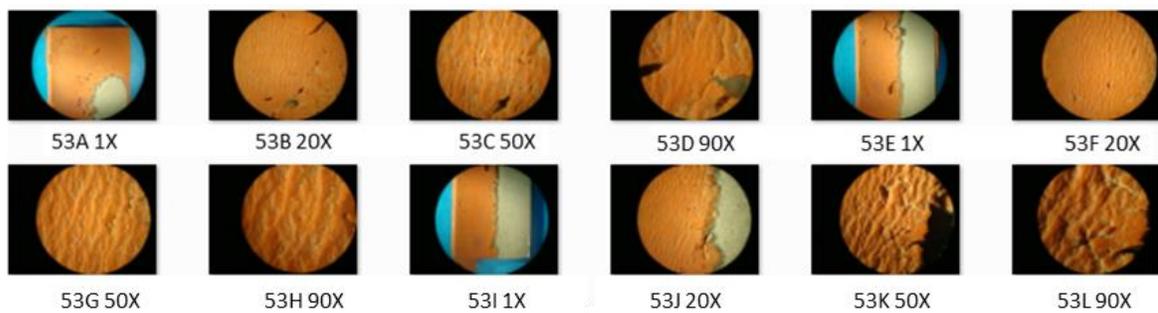
Probeta #25 Polimérica. A 1X y 20X se aprecia daño superficial severo con pérdida de gran porcentaje del recubrimiento. A los 50X y 90X puede observarse la fisuración característica del mecanismo de desgaste, con la pérdida de material posterior.



Probeta #46 Polimérica. Daño severo observado en todas las fotografías. Fisuración superficial en todas las zonas con el avance de pérdida de material consecuente con incidencia oblicua del erosivo.

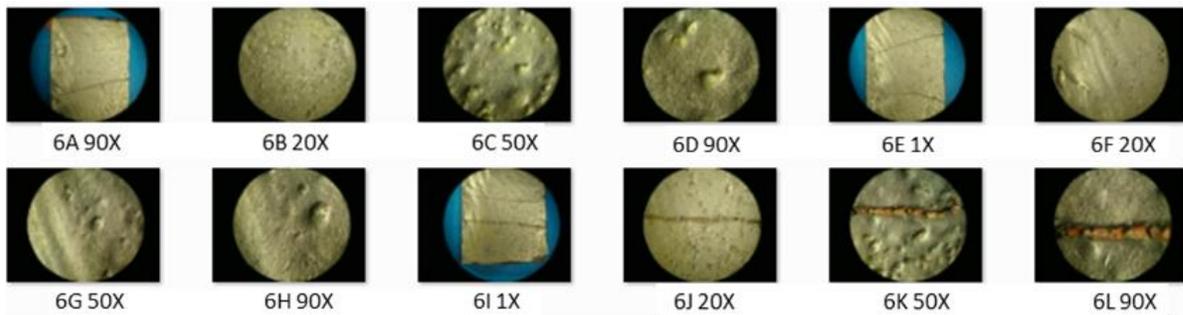


Probeta #50 Polimérica. A 1X y 20X no se aprecia daño superficial leve. A los 50X y 90X se aprecia fisuración superficial en la mayoría del recubrimiento que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico, mientras que en un bajo porcentaje del área ya se ha presentado la pérdida total de material.

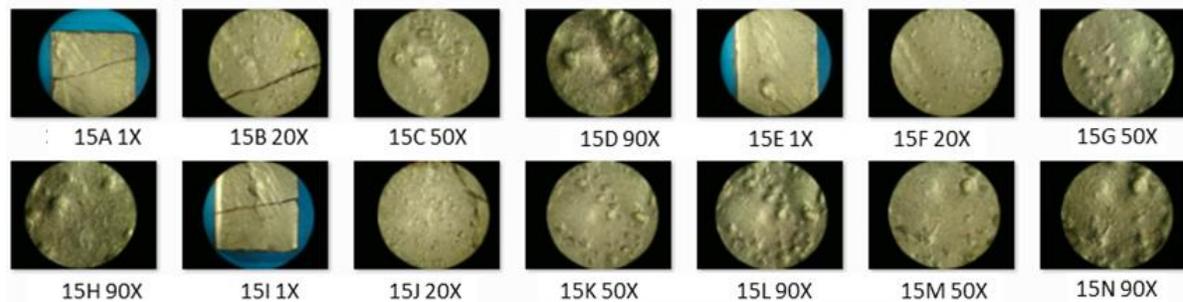


Probeta #53 Polimérica. . A 1X y 20X se aprecia daño superficial severo con pérdida de gran porcentaje del recubrimiento. A los 50X y 90X puede observarse la fisuración característica del mecanismo de desgaste, con la pérdida de material posterior a la interconexión de las mismas y fatiga propia de impactos sucesivos en la misma zona.

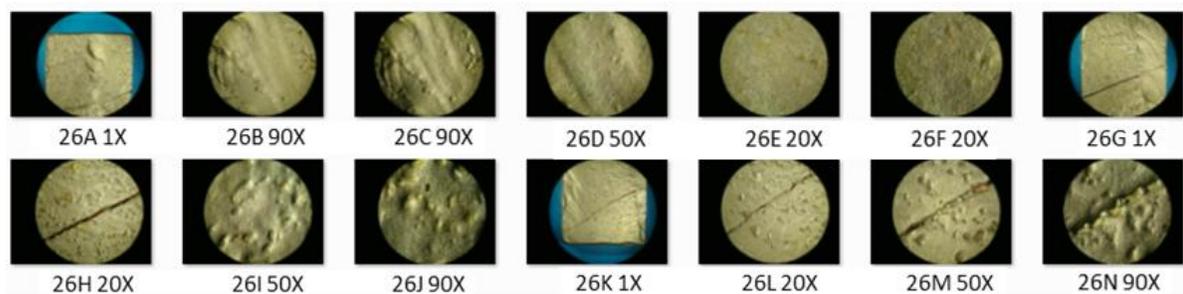
GRUPO 5



Probeta #6 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura con socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.

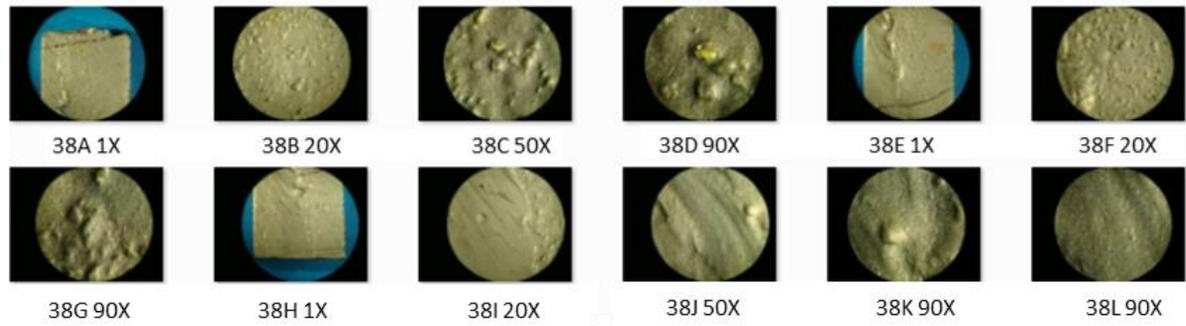


Probeta #15 Recubierta. Se aprecian socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.

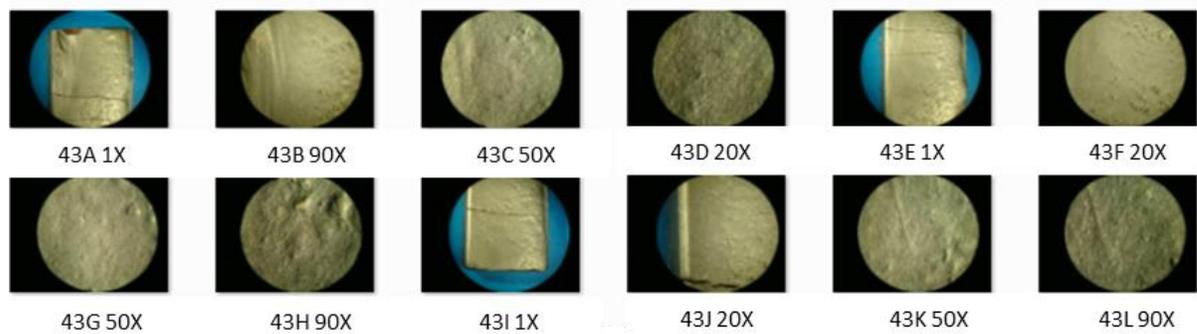


Probeta #26 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura con socavaciones irregulares en zonas específicas de la superficie que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites

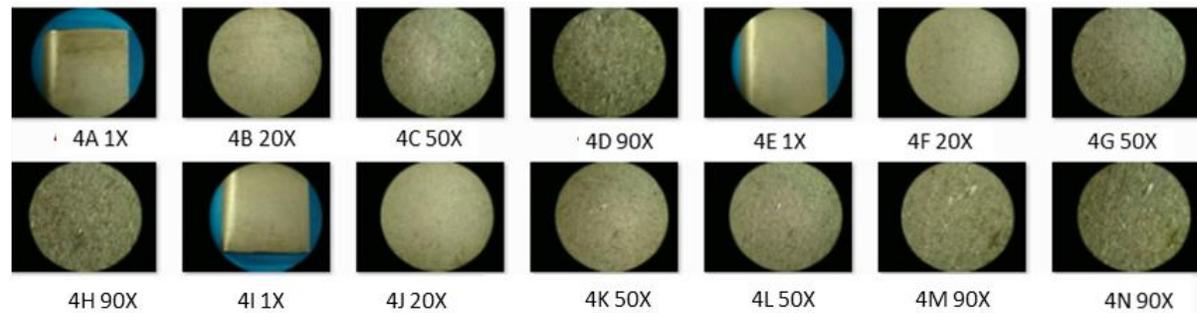
de cordones adyacentes. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



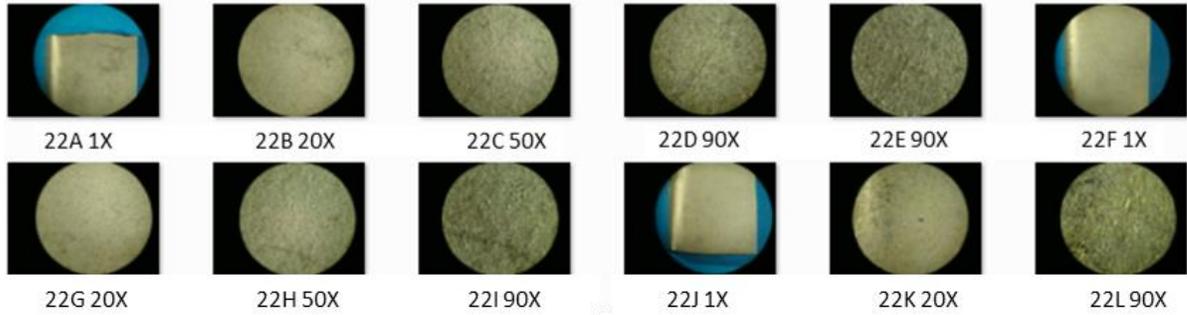
Probeta #38 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Las zonas alejadas de los límites entre cordones adyacentes presentan socavaciones irregulares que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



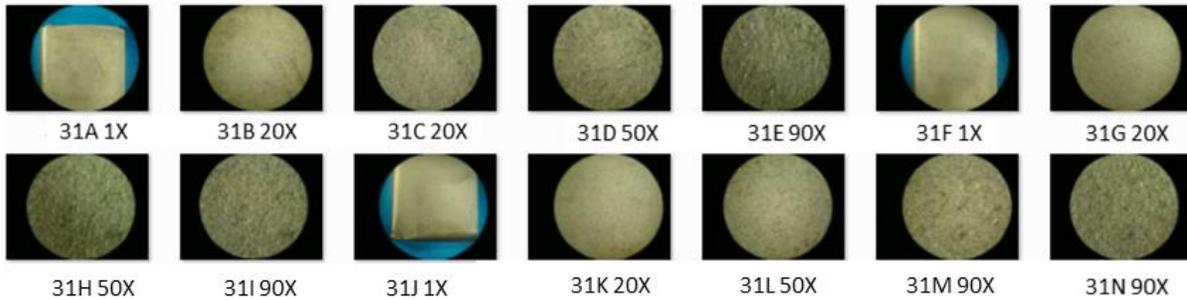
Probeta #43 Recubierta. Fisuración leve y localizada propia del proceso de soldadura. Pocas socavaciones irregulares que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. Se aprecian marcas de arado severo con deformación plástica leve y mínima indentación.



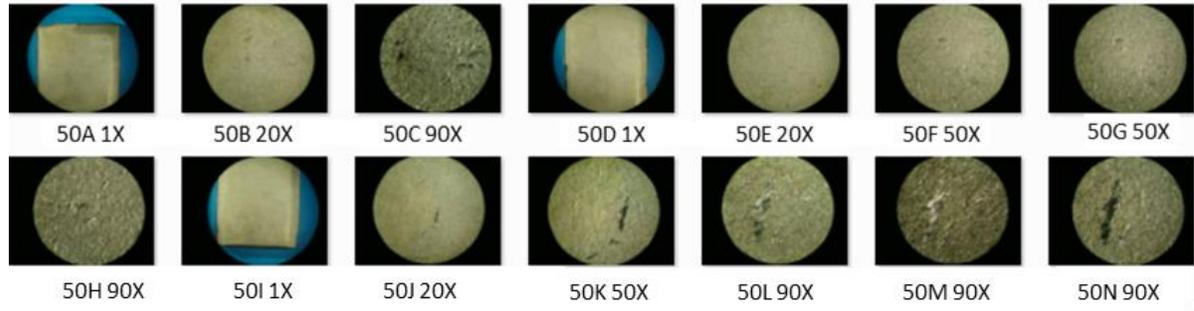
Probeta #4 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas a los 90X.



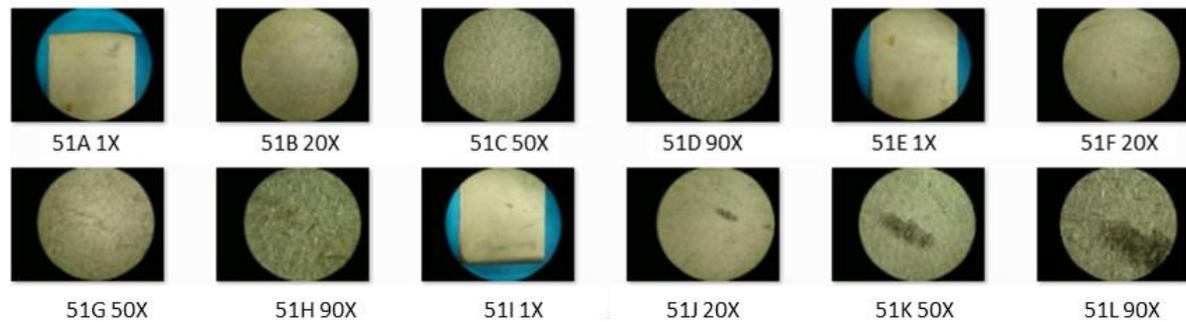
Probeta #22 Termotratada. Algunas marcas de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas a los 90X.



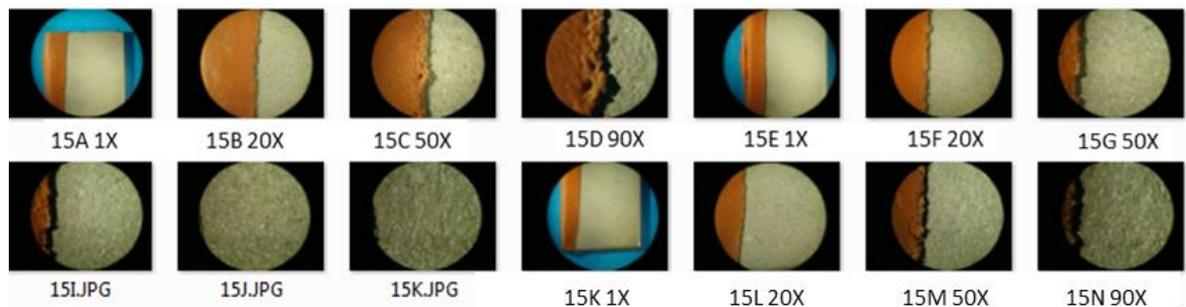
Probeta #31 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas a los 90X.



Probeta #50 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas mayormente a los 50X y 90X.

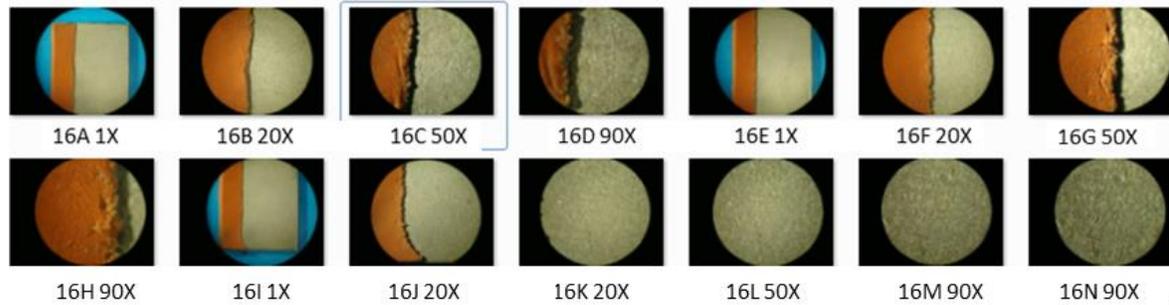


Probeta #51 Termotratada. En las fotografías a 1X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 20X, 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Marcas de arado, indentación con la consecuente deformación plástica y huellas localizadas de pérdida severa de material manifiestas mayormente a los 50X y 90X.

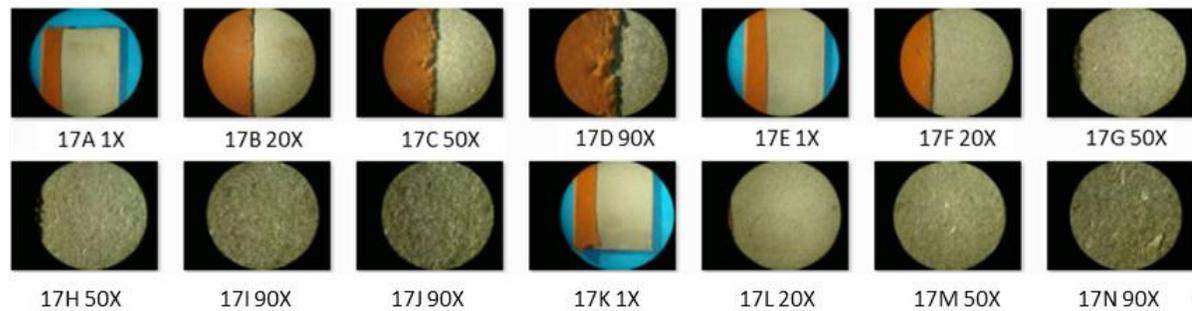


Probeta #15 Polimérica. La dirección del avance del desgaste va desde el extremo derecho hacia el izquierdo, lo cual evidencia que la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Se

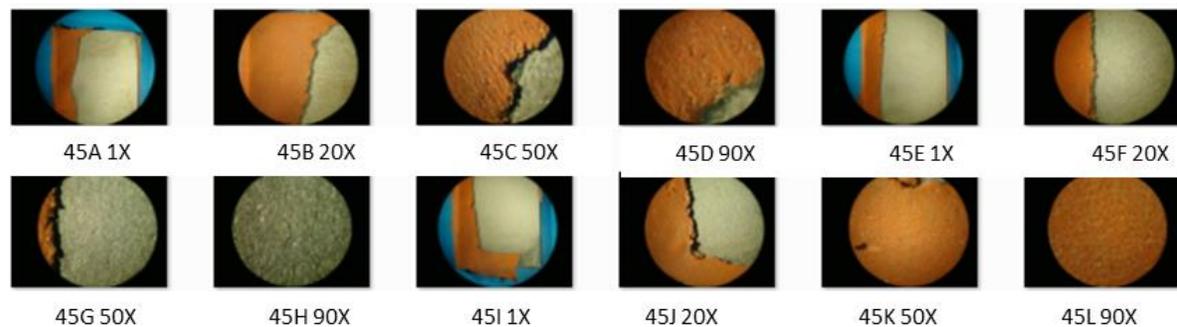
observan zonas con pérdida total del material de recubrimiento. A 90X se aprecia la degradación del material base a partir de huellas de indentación sobre la superficie.



Probeta #16 Polimérica. La dirección del avance del desgaste va desde el extremo derecho hacia el izquierdo, lo cual evidencia que la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Se observan zonas con pérdida total del material de recubrimiento. A 90X se aprecia la degradación del material base a partir de huellas de indentación sobre la superficie.

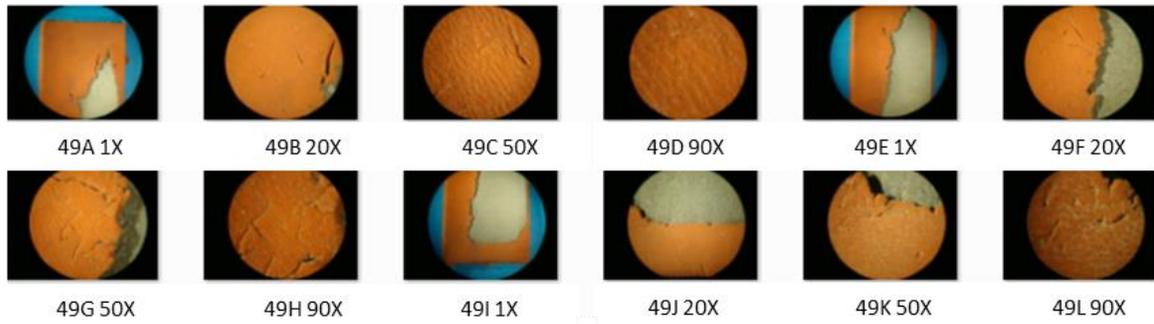


Probeta #17 Polimérica. La dirección del avance del desgaste va desde el extremo derecho hacia el izquierdo, lo cual evidencia que la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Se observan zonas con pérdida total del material de recubrimiento. A 90X se aprecia la degradación del material base a partir de huellas de indentación y arado sobre la superficie.



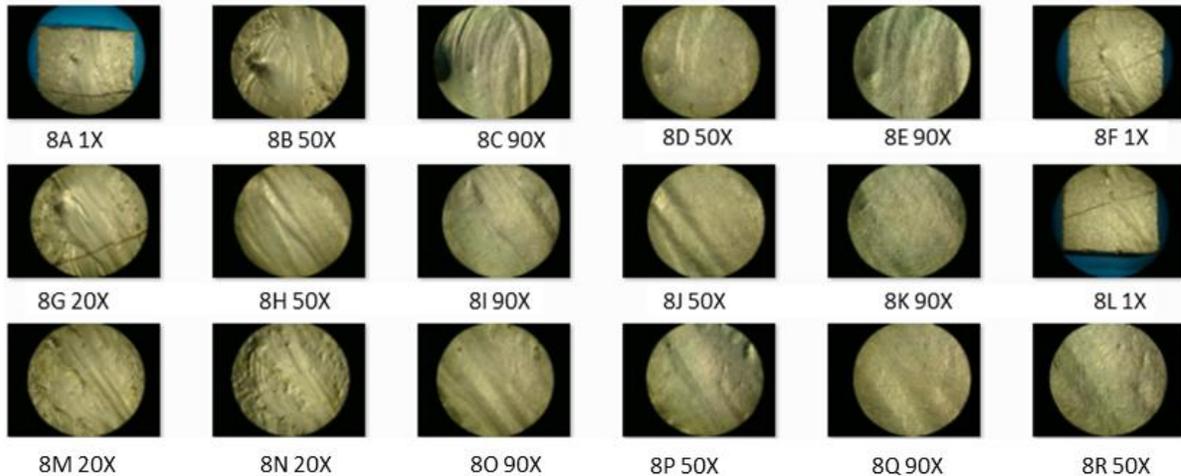
Probeta #45 Polimérica. La dirección del avance del desgaste va desde el extremo derecho hacia el izquierdo, lo cual evidencia que la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Se

observan zonas con pérdida total del material de recubrimiento. Se observa pérdida de adherencia entre el material base y el recubrimiento.

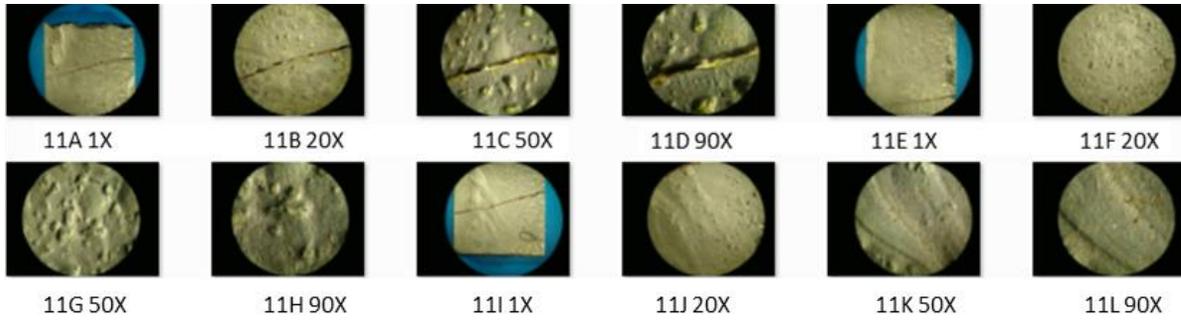


Probeta #49 Polimérica. La dirección del avance del desgaste va desde el extremo derecho hacia el izquierdo, lo cual evidencia que la incidencia del flujo erosivo es oblicua. El mecanismo de desgaste del polímero es fisuración superficial, penetración de la fisura y desprendimiento de material. Se observan zonas con pérdida total del material de recubrimiento.

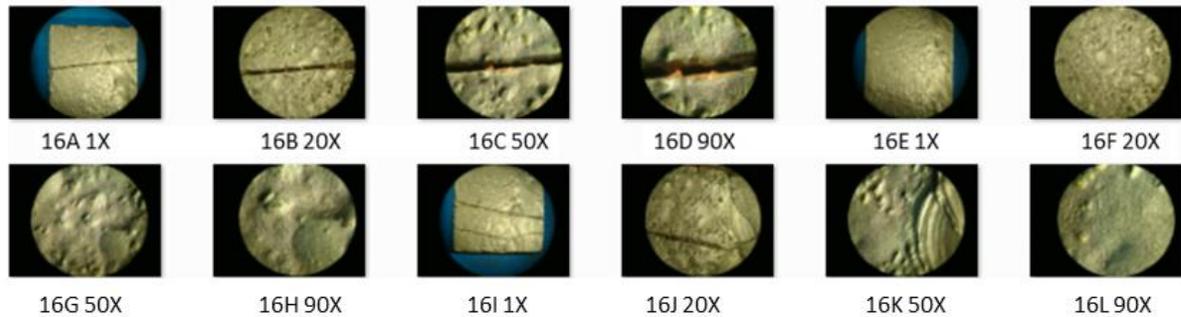
GRUPO 7



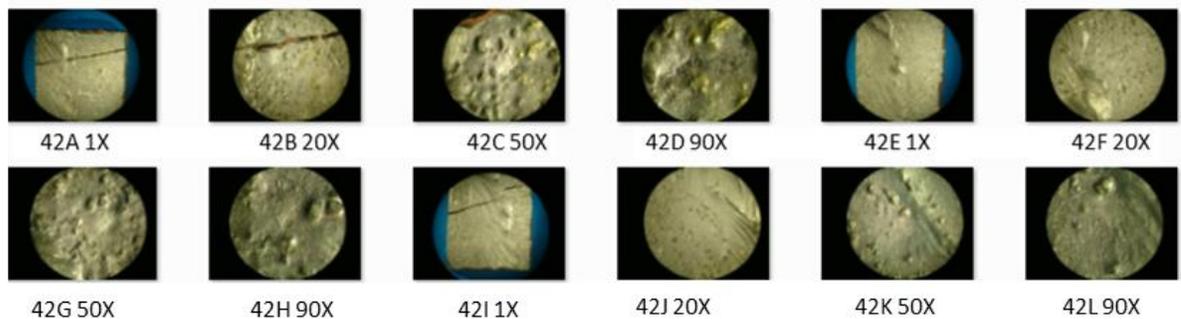
Probeta #8 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Pocas socavaciones irregulares que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



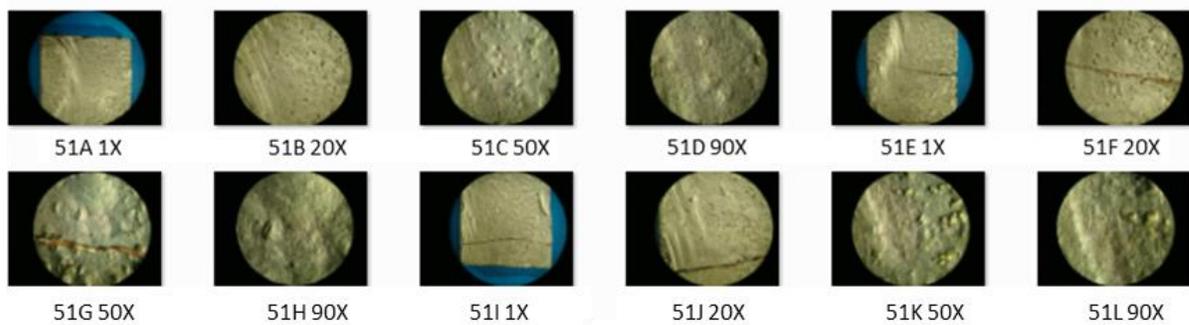
Probeta #11 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Hay zonas con numerosas socavaciones que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



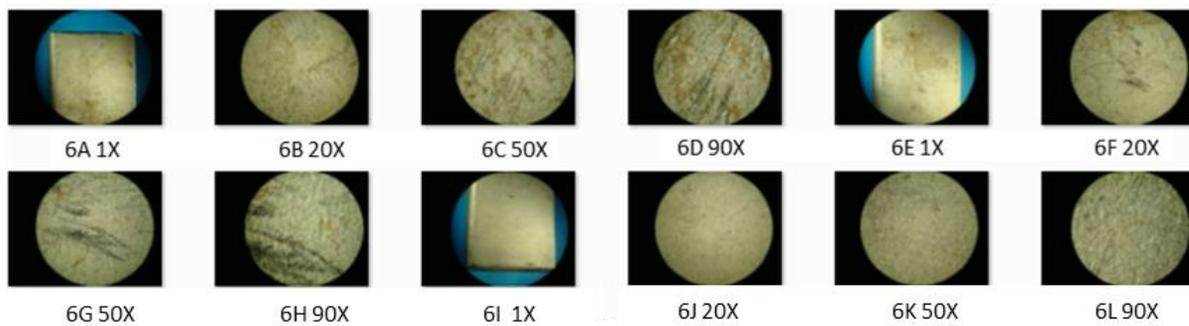
Probeta #16 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Hay zonas alejadas de los límites entre cordones adyacentes presentan socavaciones irregulares que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



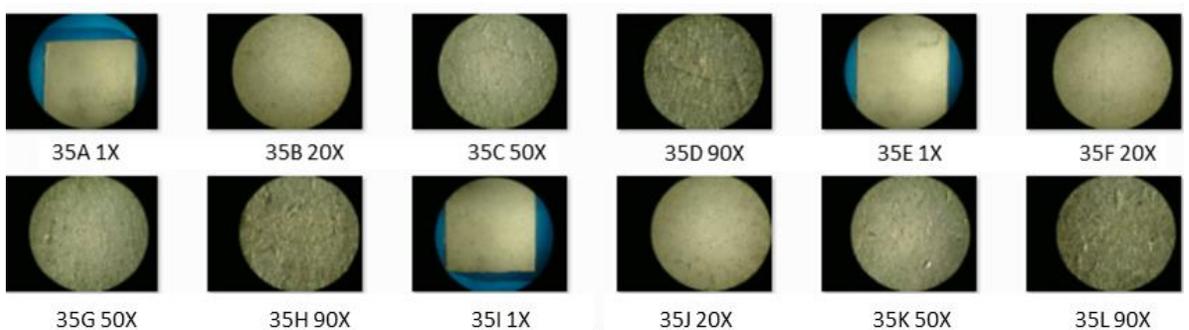
Probeta #42 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Socavaciones de tamaño irregular que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo individuales o zonas de acumulación de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



Probeta #51 Recubierta. Se aprecian socavaciones irregulares que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura.

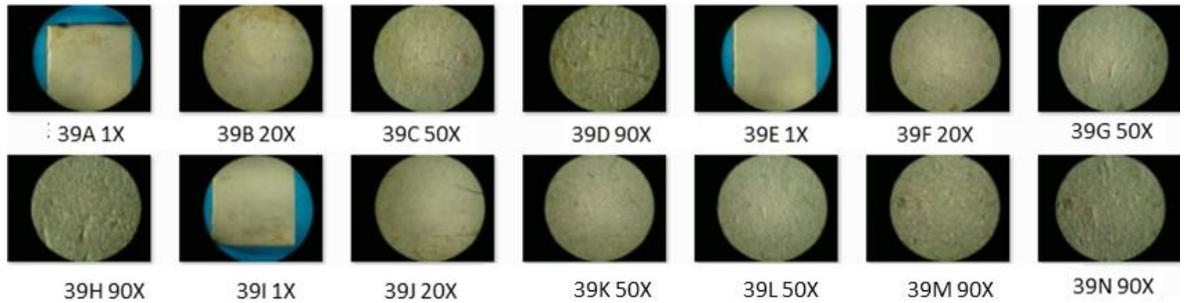


Probeta #6 Termotrada. Marcas de corrosión superficial. Arado severo localizado en zonas de inicios de corrosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación manifiestas a los 90X.

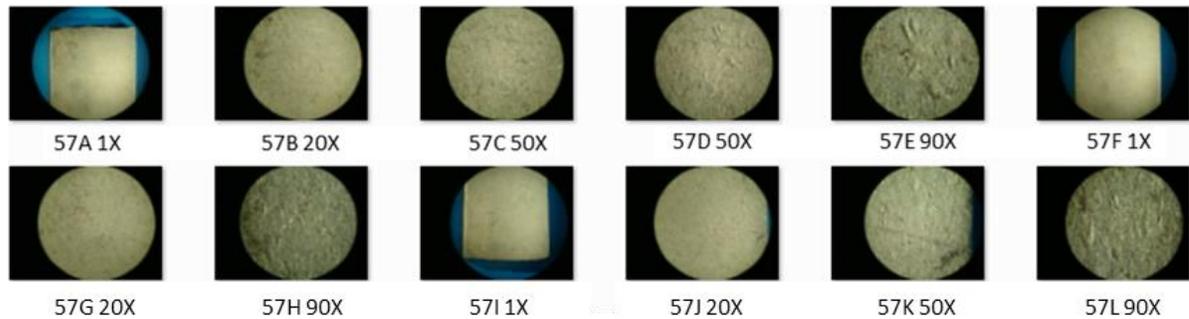


Probeta #35 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede

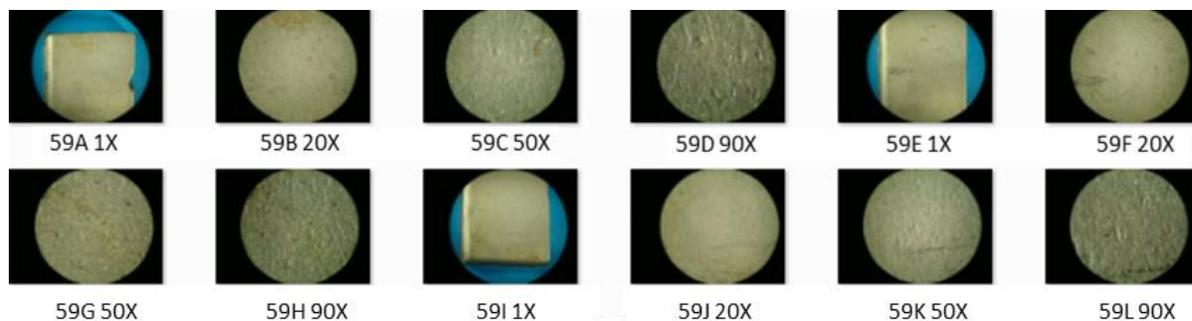
observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación se puede observar mayormente a los 50X y 90X.



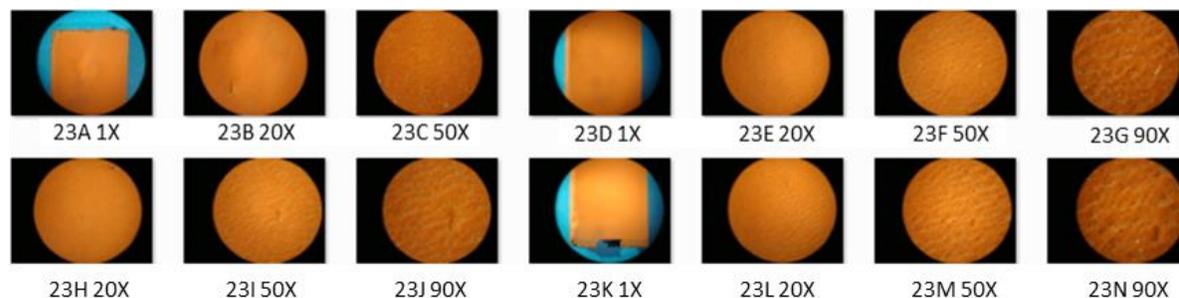
Probeta #39 Termotrada. Se observan trazas de corrosión. En las fotografías a 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión aunque con rayaduras superficiales.. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación con la consecuente deformación plástica manifiestas mayormente a los 50X y 90X.



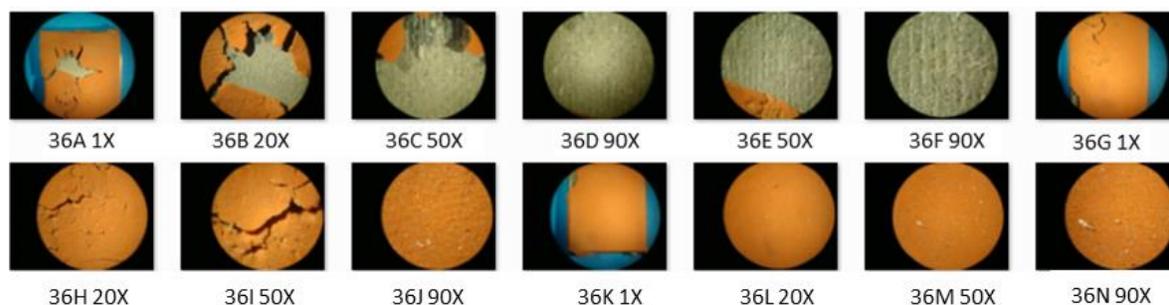
Probeta #57 Termotrada. Se observan trazas de corrosión. En las fotografías a bajos aumentos se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar un relieve de superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas marcas de arado e indentación severa con la consecuente deformación plástica manifiestas mayormente a los 50X y 90X.



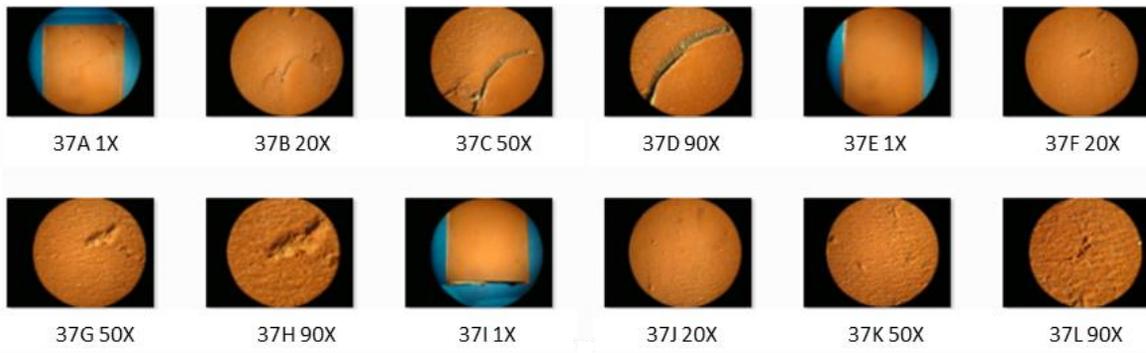
Probeta #59 Termotrataada. En las fotografías a bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas rayaduras severas localizadas que han generado pérdida acelerada de material, mientras que las indentaciones evidencian deformación plástica, manifestado mayormente a los 50X y 90X.



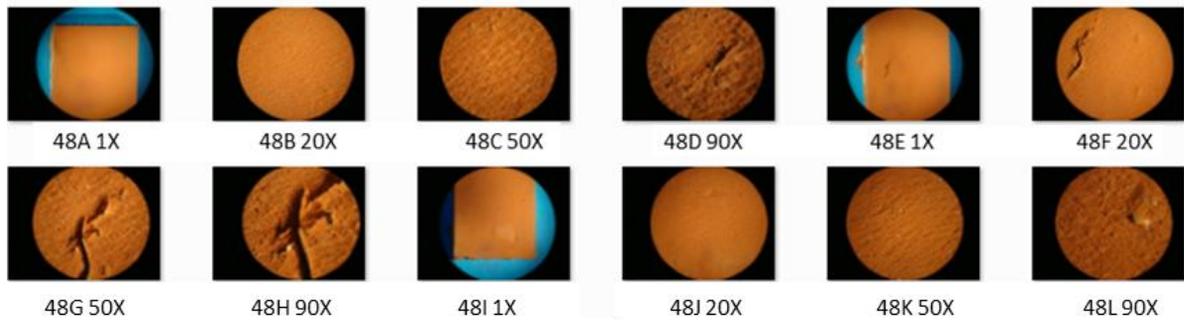
Probeta #23 Polimérica. A 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse un daño superficial caracterizado por fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste.



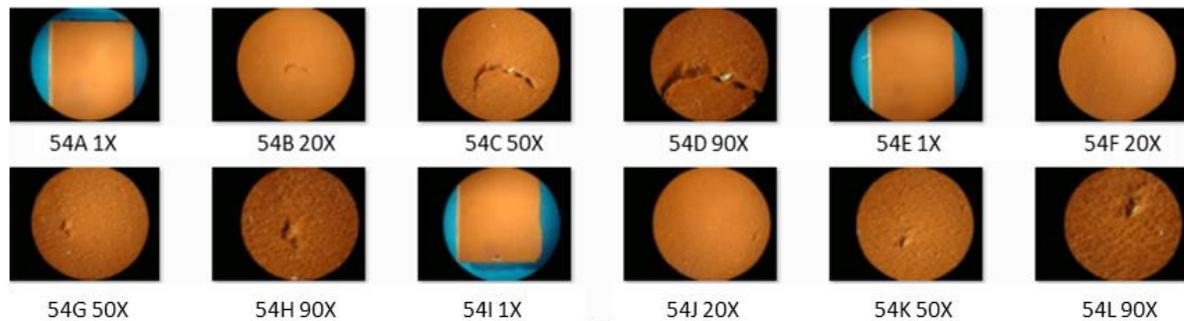
Probeta #36 Polimérica. Hay daño severo en una de las zonas del recubrimiento, a partir de un deterioro superficial con fisuración, rotura localizada y pérdida total del material de recubrimiento. En las otras zonas del recubrimiento, A 1X y 20X no se aprecia daño superficial, el proceso de desgaste es muy leve, aun cuando a los 50X y 90X ya pueden observarse olas a partir de fisuración leve que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.



Probeta #37 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

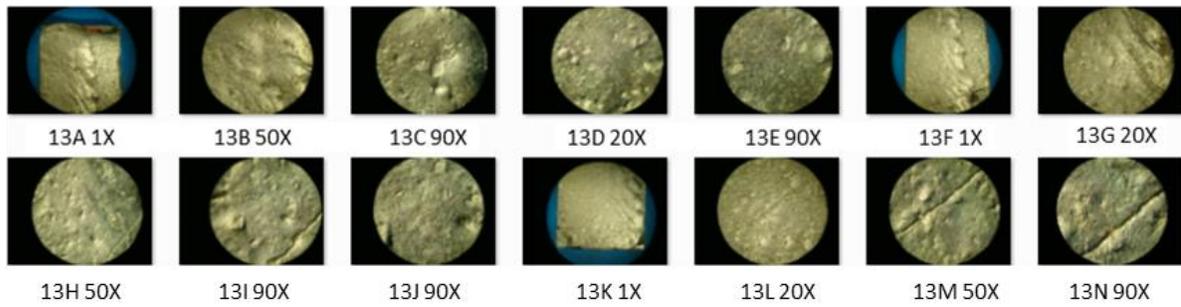


Probeta #48 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes y daños localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

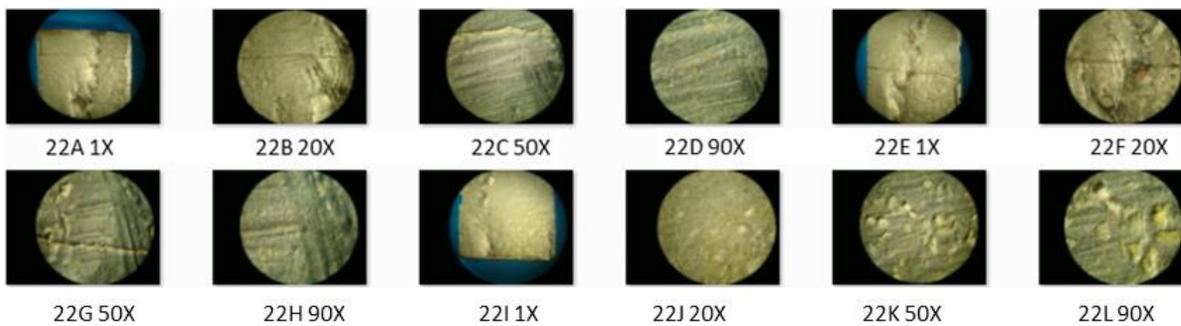


Probeta #54 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

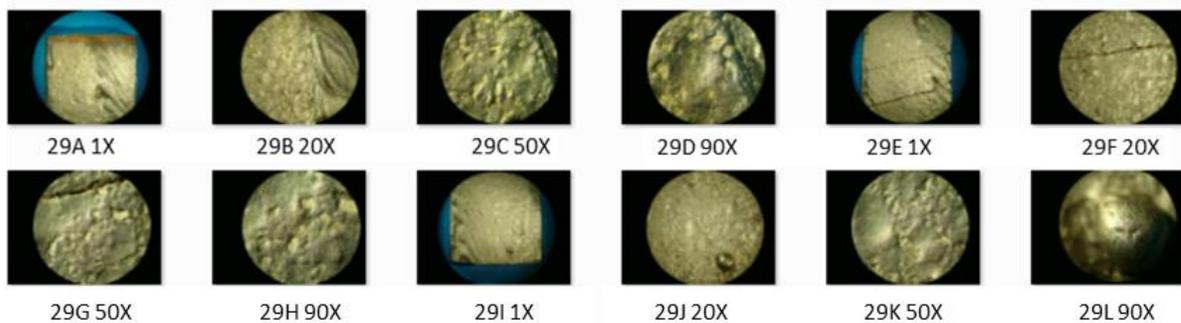
GRUPO 8



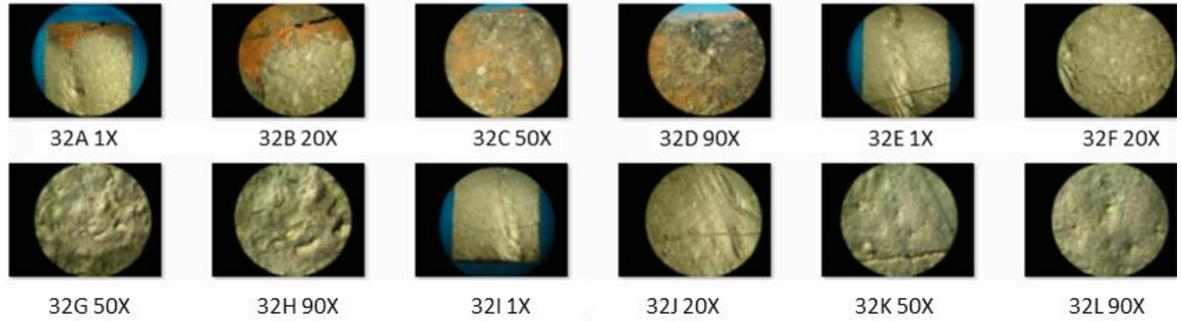
Probeta #13 Recubierta. Fisuración mínima localizada, propia del proceso de soldadura. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en los límites de cordones adyacentes. Socavaciones de tamaño irregular alejados de las zonas de límites de fusión entre cordones que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



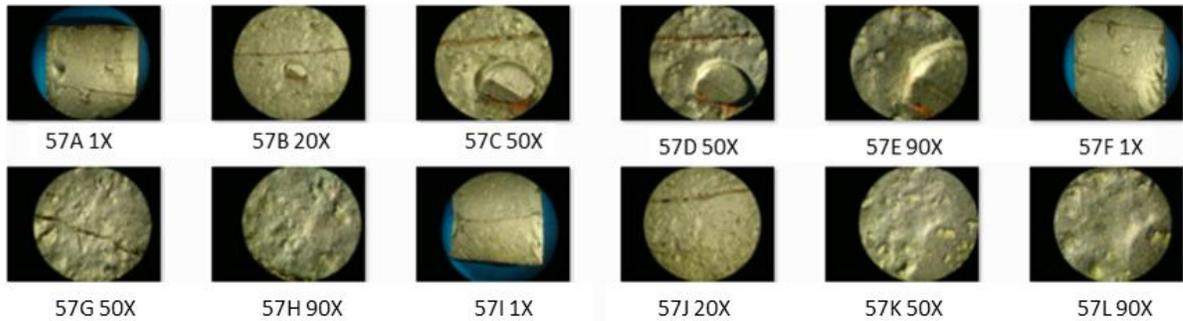
Probeta #22 Recubierta. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Marcas de herramienta de pulido ó corte. Socavaciones de tamaño irregular que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo individuales o zonas de acumulación de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



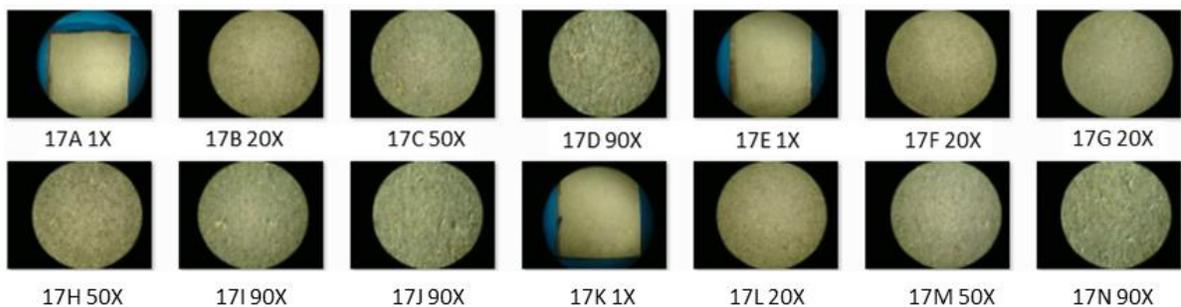
Probeta # 29 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Socavaciones de tamaño irregular que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo individuales o zonas de acumulación de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



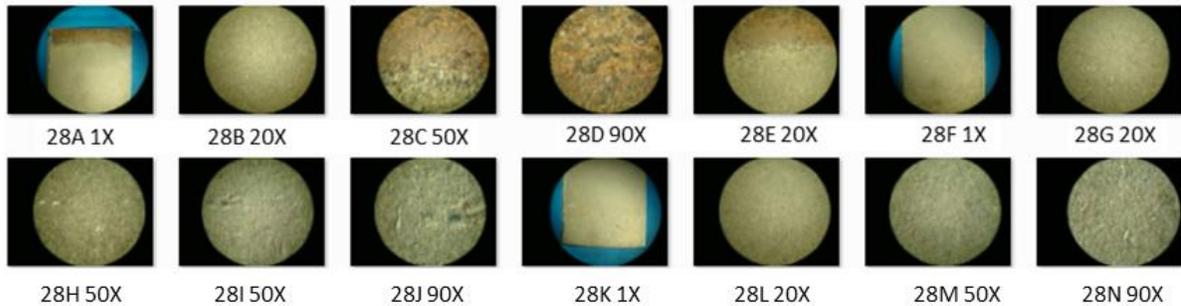
Probeta #32 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general y en los límites de cordones adyacentes. Pocas socavaciones de tamaño irregular que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



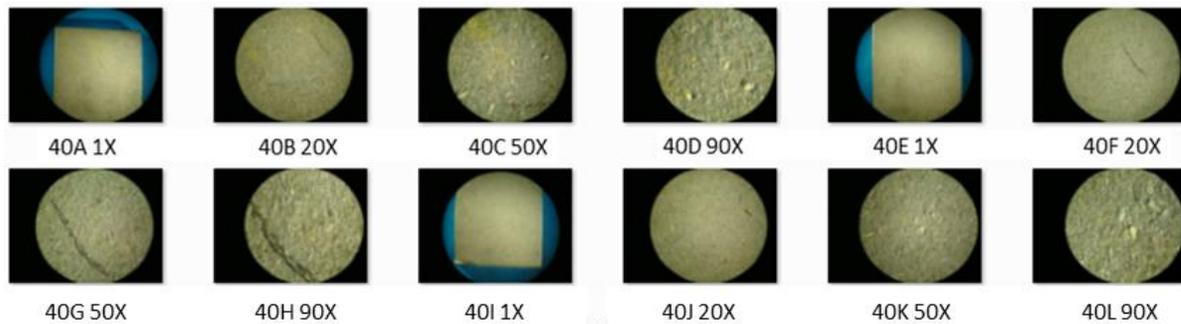
Probeta #57 Recubierta. Defectos severos en el depósito del recubrimiento en general. Fisuración severa localizada propia del proceso de soldadura. Pocas socavaciones de tamaño irregular que puede ser consistente con remoción de carburos de cromo individuales o zonas de acumulación de carburos de cromo. A nivel microscópico no se aprecian marcas de arado severo ó deformación plástica severa.



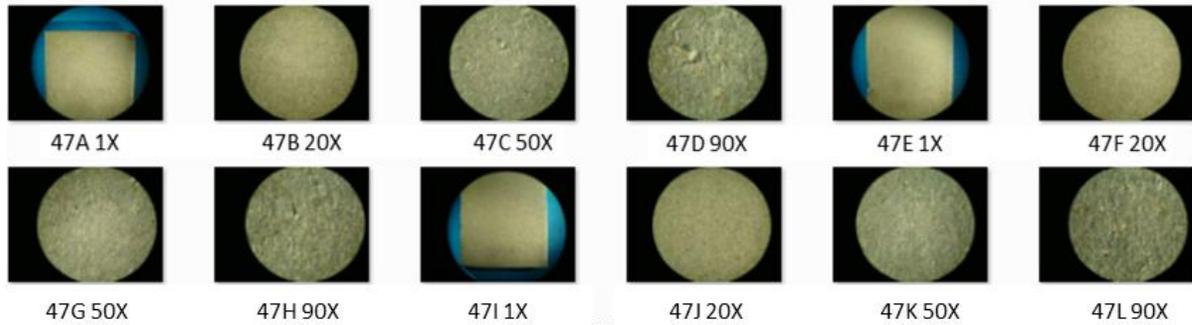
Probeta #17 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro con marcas de indentaciones con evidente deformación plástica.



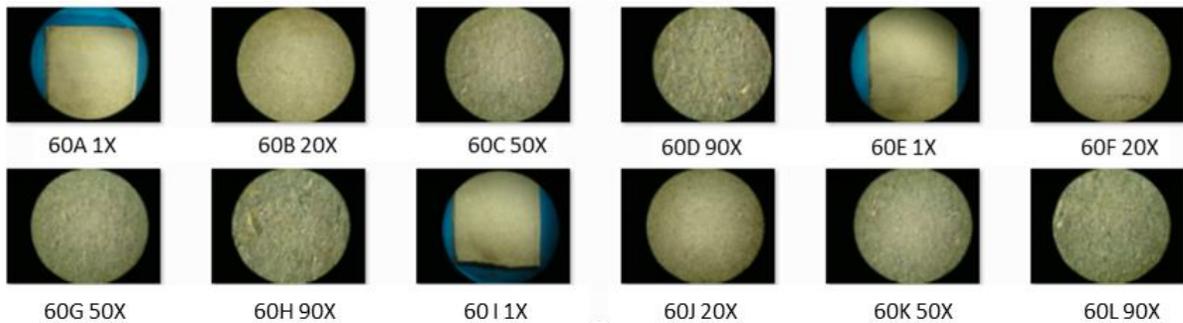
Probeta #28 Termotratada. A bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme sin daño superficial aparente, sin embargo en las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro severo. Se aprecian indentaciones que sugieren impactos severos con deformación plástica correspondiente.



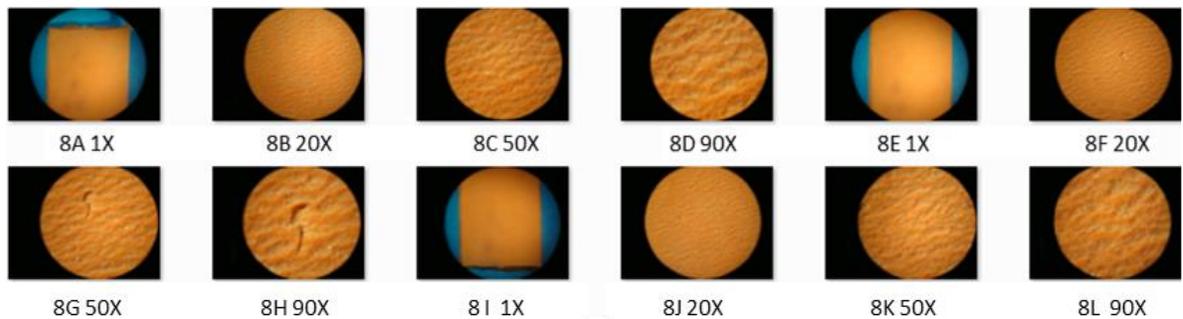
Probeta 40 Termotratada. En las fotografías a bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro. Algunas rayaduras severas localizadas que han generado pérdida acelerada de material, mientras que las indentaciones evidencian deformación plástica, manifestado mayormente a los 50X y 90X.



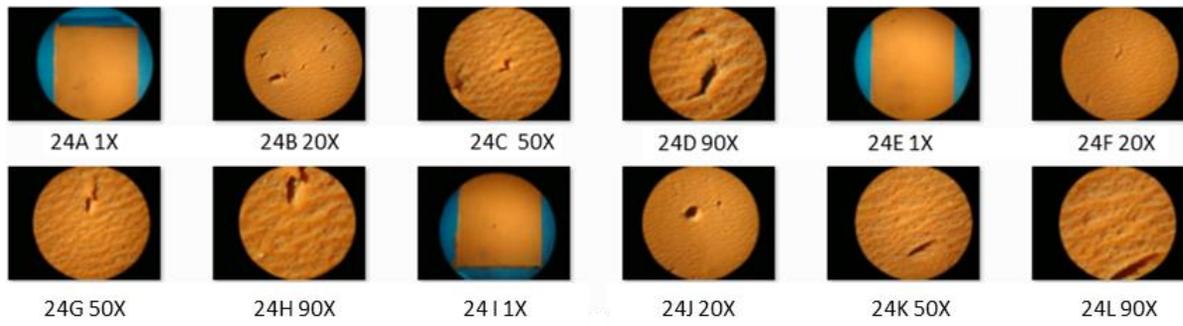
Probeta #47 Termotrada. A bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente por erosión. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro como indentaciones con evidente deformación plástica.



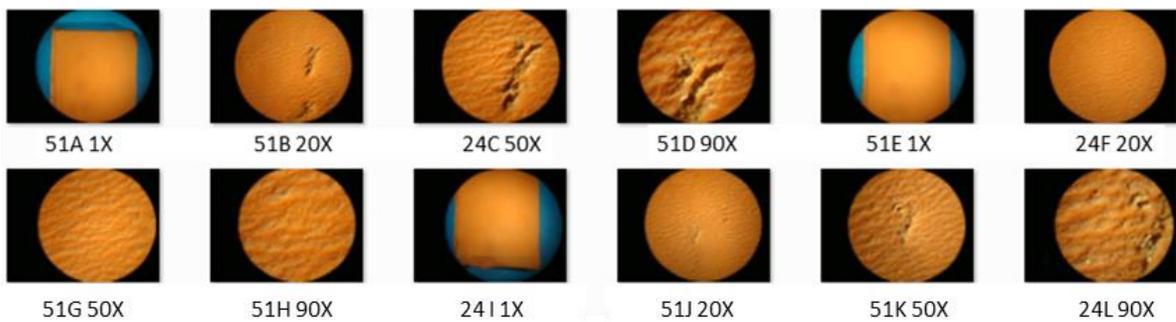
Probeta #60 Termotrada. En las fotografías a bajos aumentos, 1X y 20X se aprecia una superficie uniforme y sin daño superficial aparente. En las fotografías a 50X y 90X se puede observar una superficie irregular y con signos de deterioro.



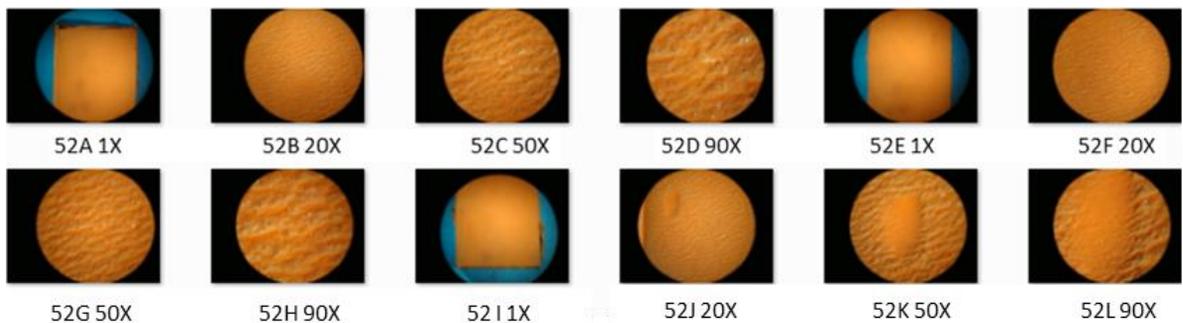
Probeta #8 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.



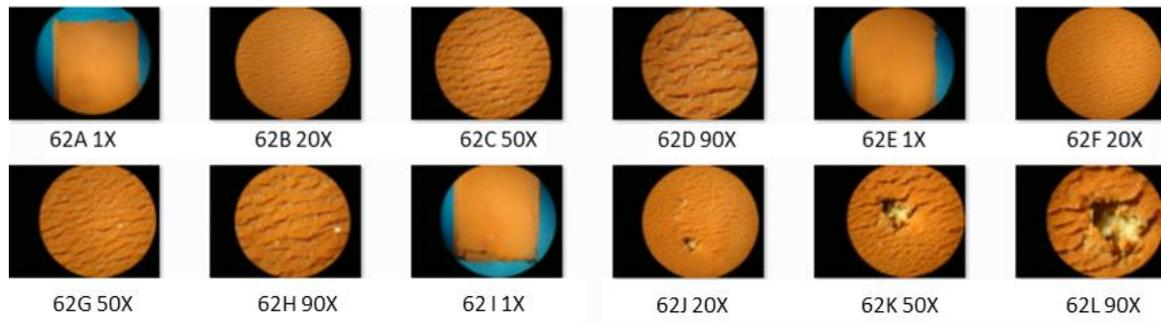
Probeta #24 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes ó daños localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.



Probeta #51 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes ó daños localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.



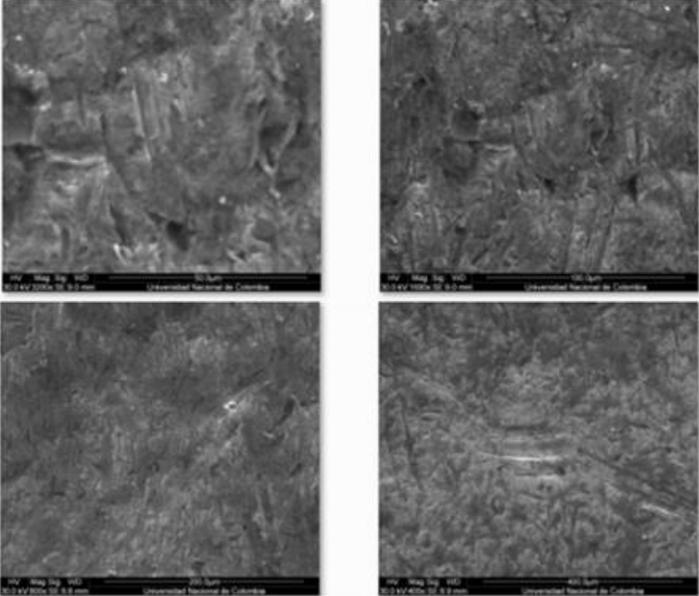
Probeta #52 Polimérica. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes ó daños localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.



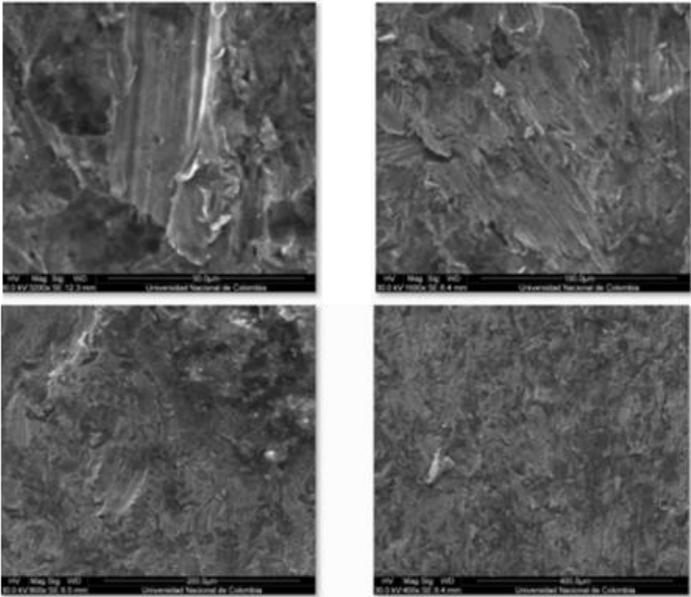
Probeta #62 Polimérica. Acumulación de material erosivo en algunos puntos específicos del recubrimiento. En general, a 1X y 20X no se aprecia daño superficial evidente salvo algunos cortes ó daños localizados. El proceso de desgaste es muy leve, sin embargo a los 50X y 90X ya puede observarse fisuración superficial que denota el inicio del mecanismo de desgaste característico.

ANEXO H: Fotografías de Análisis SEM por Grupos Experimentales

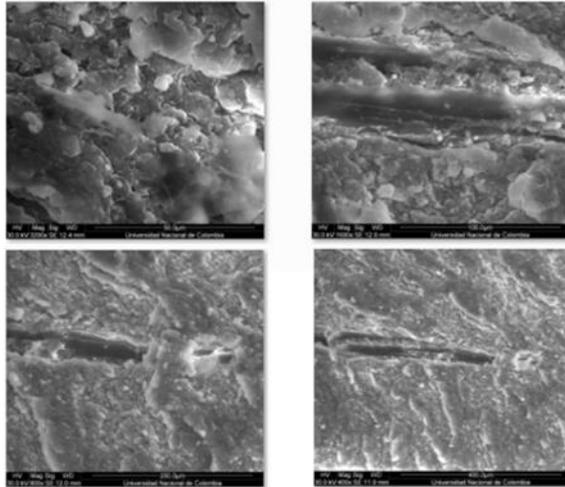
Grupo 1



Probeta #9 Recubierta con soldadura. Marcas de arado con deformación plástica leve, e impactos puntuales con formación de bordes en rededor.



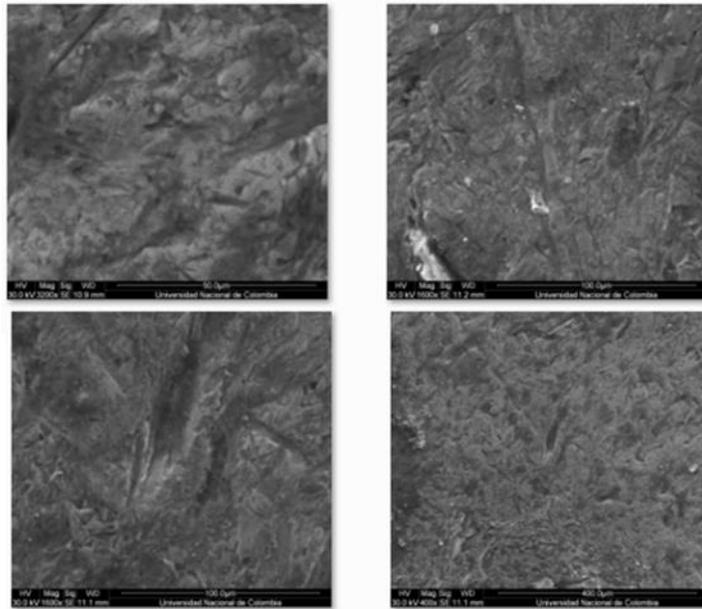
Probeta #27 Termotratada. Mecanismo de desgaste dúctil. Marcas de arado severas con deformación plástica y desplazamiento de material hacia los lados de la huella.



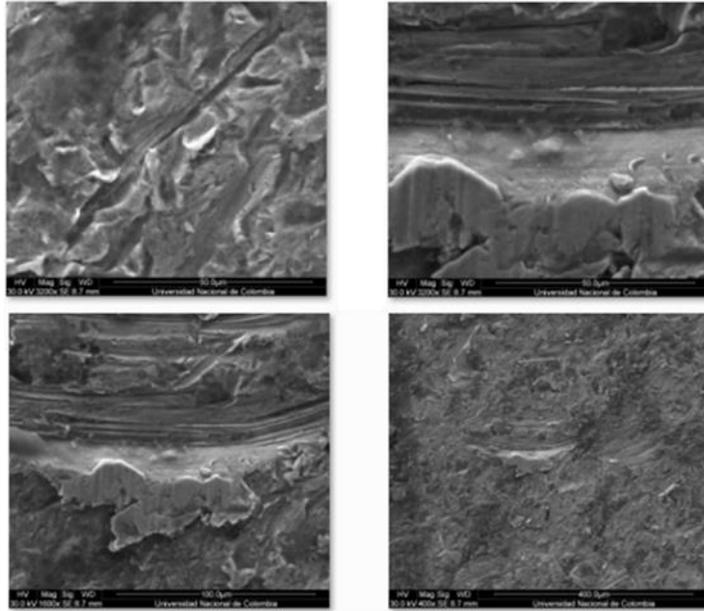
Probeta #5 Recubierta con silicona. Se aprecia corte superficial aislado, olas como primer paso en la formación de fisuras, características del mecanismo de desgaste

Análisis SEM probetas 19 Recubierta, 27 Termotratada, 5 Polimérica

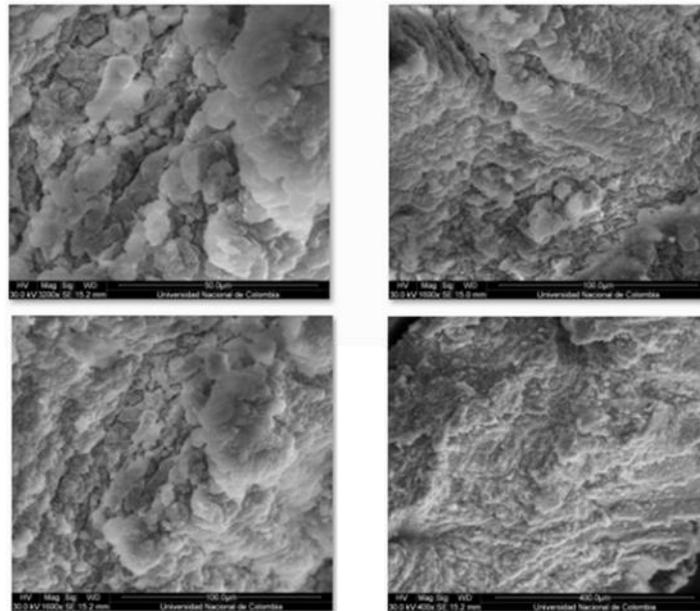
GRUPO 2



Probeta #14 Recubierta con soldadura. Marcas de arado con deformación plástica leve.



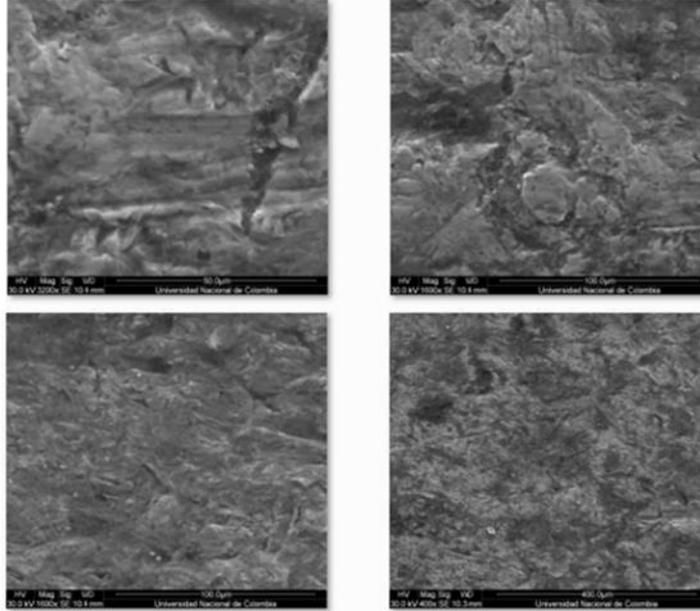
Probeta #16 Termotratada. Marcas de arado severas con deformación plástica y desplazamiento de material hacia los lados de la huella correspondiente con mecanismo de desgaste dúctil.



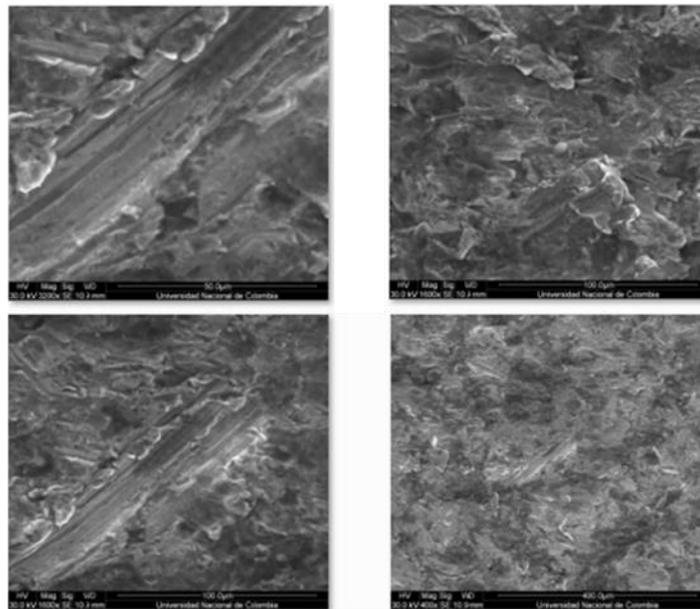
Probeta #11 Recubierta con silicona. Formación de nódulos coincidentes con impactos con partículas erosivas incidiendo con ángulos cercanos a los 90°

Análisis SEM probetas 14 Recubierta, 16 Termotratada, 11 Polimérica

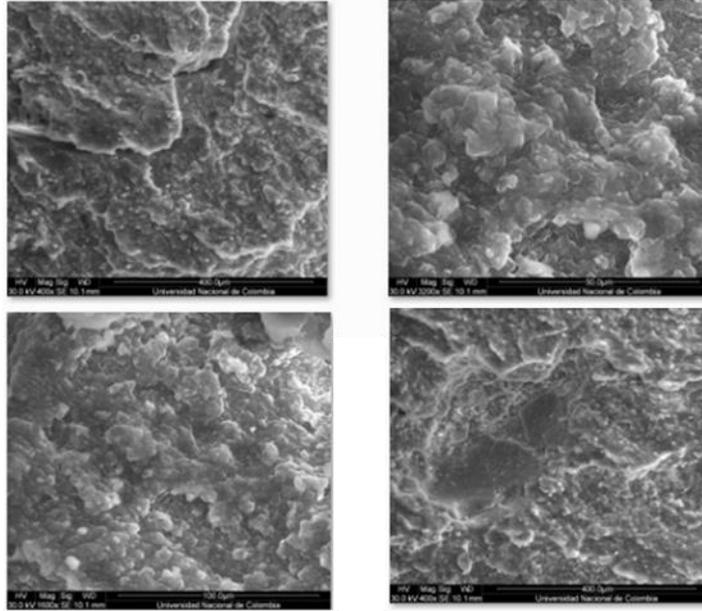
GRUPO 3



Probeta #37 Recubierta con soldadura. Marcas de arado leve, fisuración y fractura leve consistente con impactos en zonas microestructurales de gran acumulación carburos de cromo.



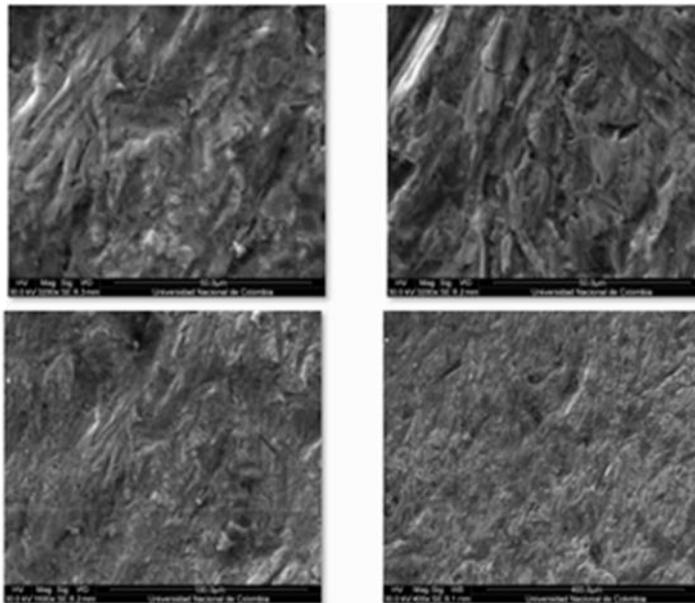
Probeta #34 Termotratada. Mecanismo de desgaste dúctil. Marcas de arado severas con deformación plástica y desplazamiento de material hacia los lados de la huella.



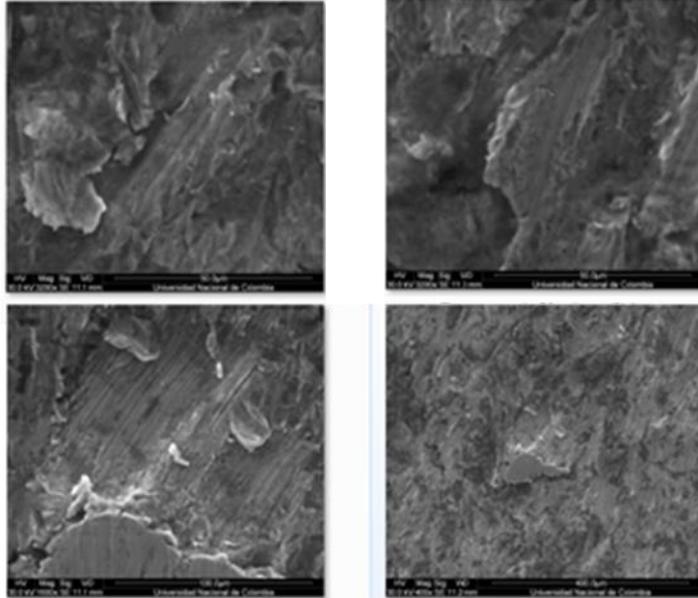
Probeta #14 Recubierta con silicona. Formación de olas como primer paso en la formación de fisuras que se interconectan para generar desprendimientos localizados de material.

Análisis SEM probetas 37 Recubierta, 34 Termotratada, 14 Polimérica

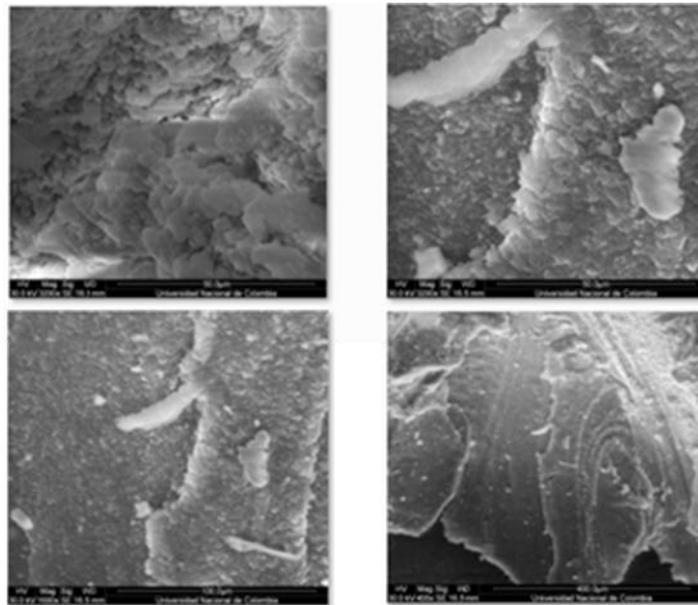
GRUPO 4



Probeta #3 Recubierta con soldadura. Microarado, microfisuración y microfractura leve. Deformación plástica baja.



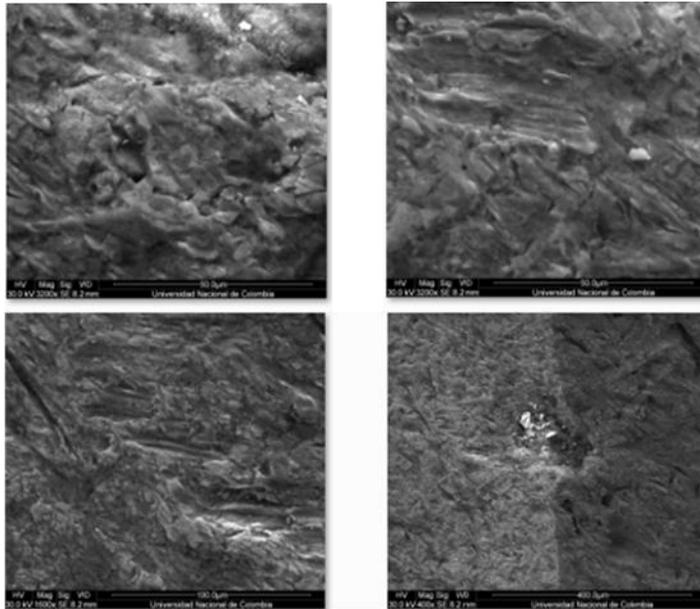
Probeta #18 Termotratada. Mecanismo de desgaste dúctil. Marcas de arado severas con deformación plástica y desplazamiento de material hacia los lados de la huella. Formación de laminillas y desprendimiento de éstas por impactos sucesivos.



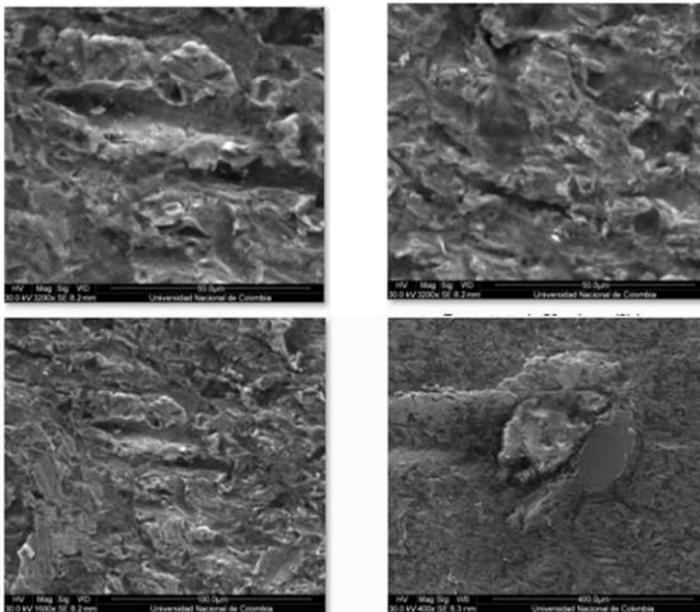
Probeta #50 Recubierta con silicona. El mecanismo sobre la superficie es consistente con el que se genera al ser impactada con ángulos menores a 45°. Fisuración y remoción de material por microfractura y/o microcutting

Análisis SEM probetas 3 Recubierta, 18 Termotratada, 50 Polimérica

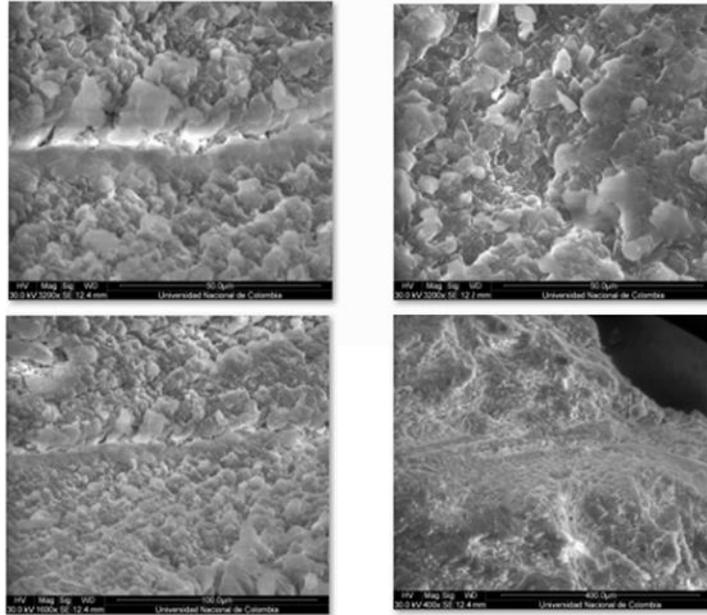
GRUPO 5



Probeta #38 Recubierta con soldadura. Microarado, microfisuración y microfractura leve. Deformación plástica baja. Remoción localizada de material



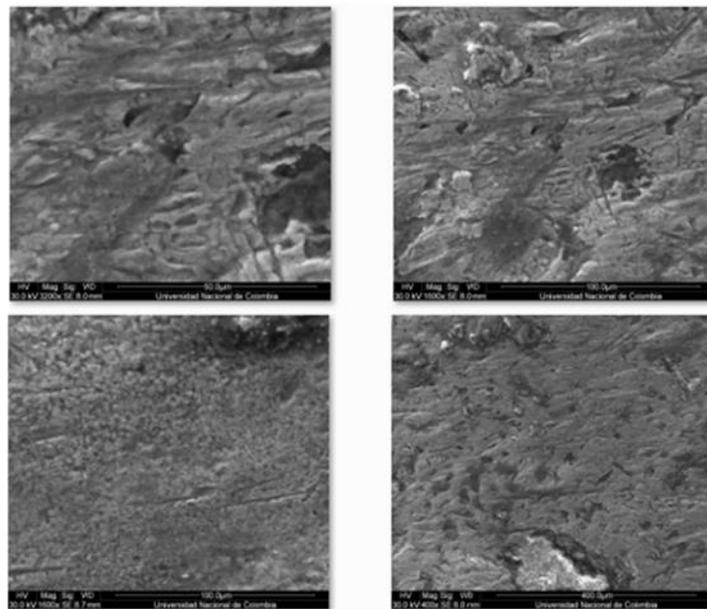
Probeta #51 Termotratada. Mecanismo de desgaste dúctil. Marcas de arado severas con deformación plástica y desplazamiento de material hacia los lados de la huella con formación de bordes y laminillas que facilitan desprendimiento de éstas por impactos sucesivos.



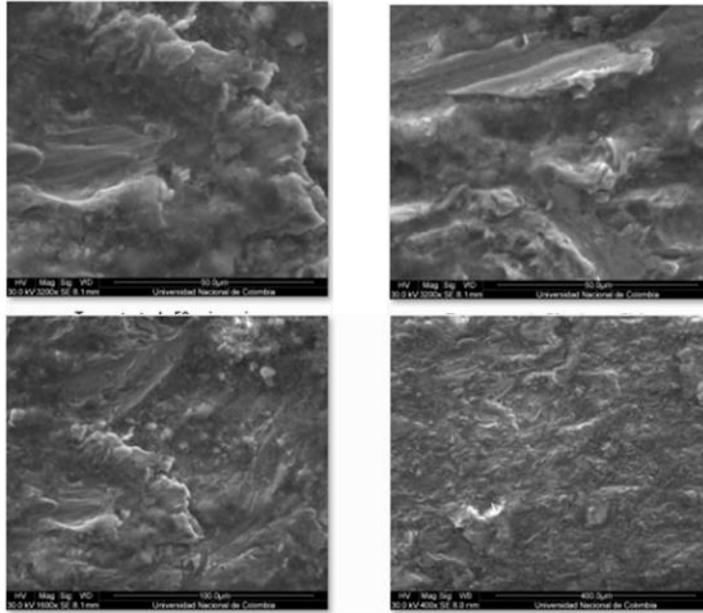
Probeta #16 Recubierta con silicona. Combinación de nódulos con formación de laminillas. Ángulos de incidencia medios, fisuración y microfisuración con posterior remoción de material por interconexión de las mismas.

Análisis SEM probetas 38 Recubierta, 51 Termotratada, 16 Polimérica

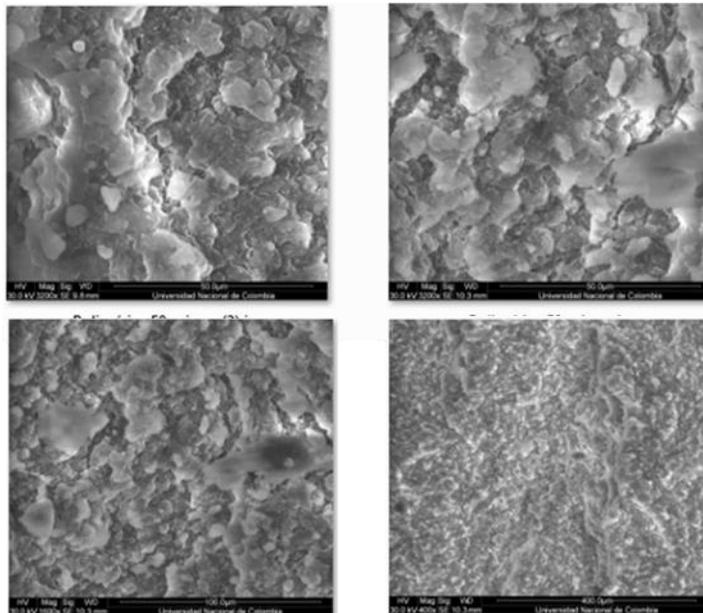
GRUPO 8



Probeta #13 Recubierta con soldadura. Marcas de arado leve y remoción severa localizada de material consistente con impactos en zonas cuya microestructura contiene granos grandes de carburos de cromo.



Probeta #28 Termotratada. Deformación plástica y desplazamiento de material con formación de bordes y laminillas que facilitan desprendimiento de éstas por impactos sucesivos. Mecanismo de desgaste dúctil.

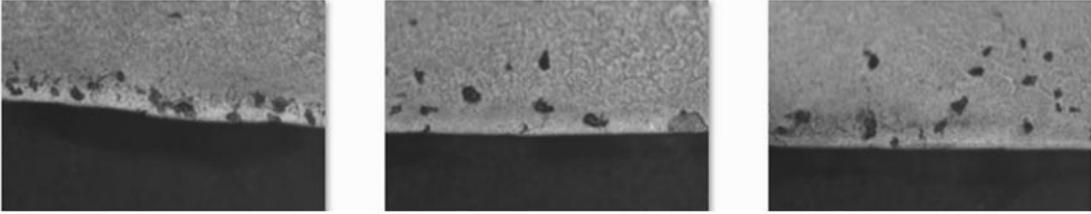


Probeta #24 Recubierta con silicona. Se observan impactos y deformación previa a la formación de laminillas y fractura.

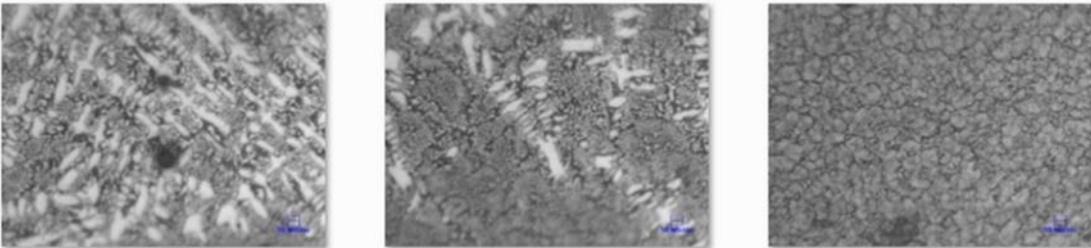
Análisis SEM probetas 13 Recubierta, 28 Termotratada, 24 Polimérica

ANEXO I: Fotografías de Análisis Metalográfico

GRUPO 1

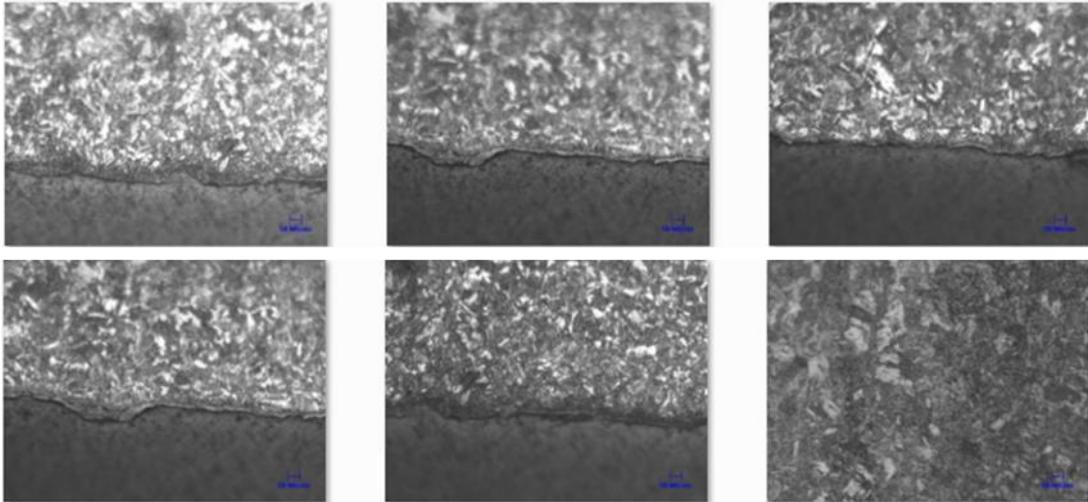


Probeta #19 Recubierta con soldadura. Cara de trabajo. Borde uniforme. Numerosos defectos propios del proceso de soldadura



Probeta #19 Recubierta con soldadura. Microestructura al interior del cordón de soldadura de recubrimiento. Crecimiento dendrítico de carburos de cromo. Matriz ledeburítica uniforme

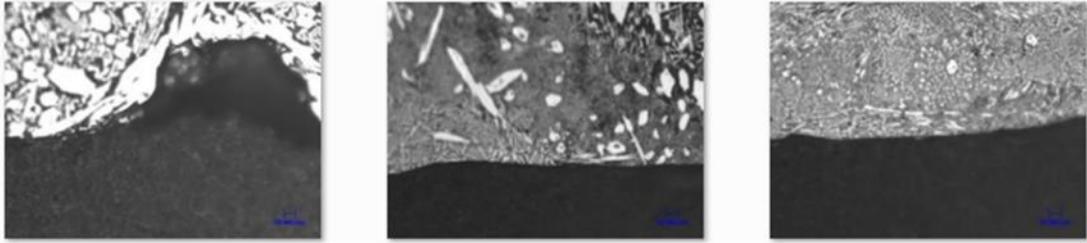
Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 19. Superficie e Interior



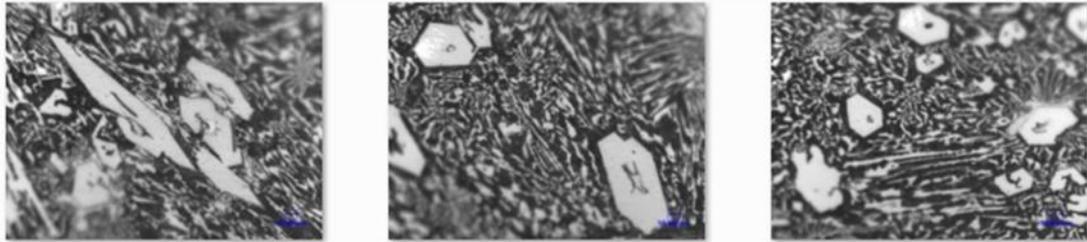
Probeta #27 Termotratada. Superficie de trabajo. Desprendimiento de material en zonas de menor dureza. La microestructura muestra martensita con austenita retenida y es uniforme tanto hacia el borde de trabajo como hacia el interior de la probeta.

Microestructura Probeta 27 Termotratada. Superficie e Interior

GRUPO 2

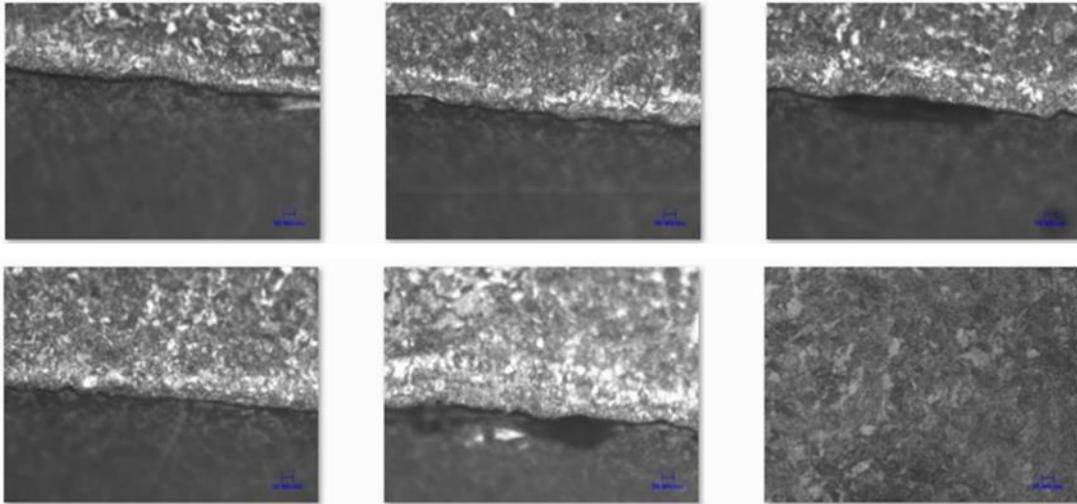


Probeta #14 Recubierta con soldadura. Corte transversal de la probeta, microestructura del borde del recubrimiento. Zonas con alta acumulación de grandes carburos de cromo que facilitan la pérdida de material por microfractura. Las zonas con carburos más pequeños ó mejor distribuidos mantienen una superficie de trabajo uniforme y sin pérdidas de material localizadas



Probeta #14 Recubierta con soldadura. La microestructura del corte transversal del cordón de recubrimiento es de carácter ledeburítico, con carburos de cromo grandes hexagonales y alargados.

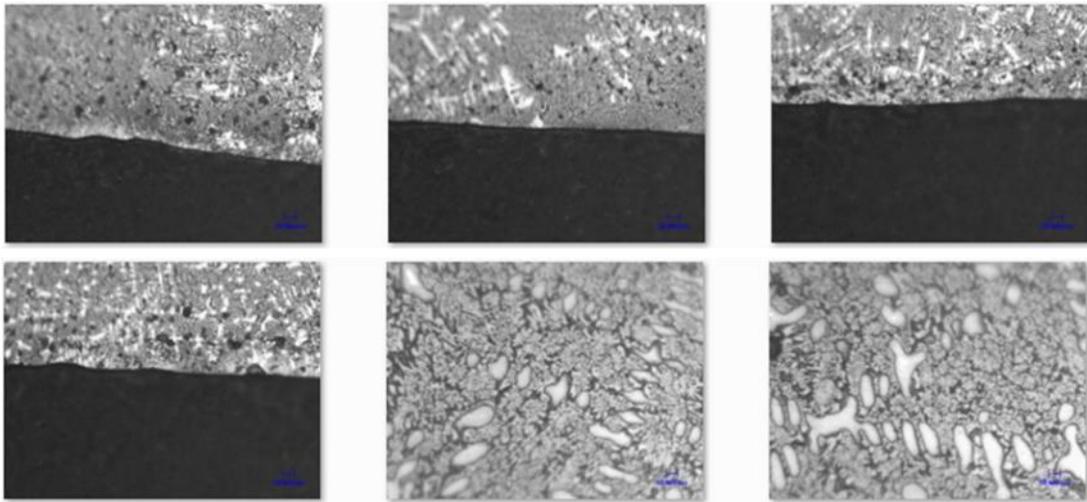
Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 14. Superficie e Interior



Probeta #16 Termotrada. Corte transversal de la superficie de trabajo. La microestructura muestra martensita con austenita retenida y es uniforme tanto hacia el borde de trabajo como hacia el interior de la probeta. Desprendimiento irregular de material sobre todo el borde expuesto a erosión.

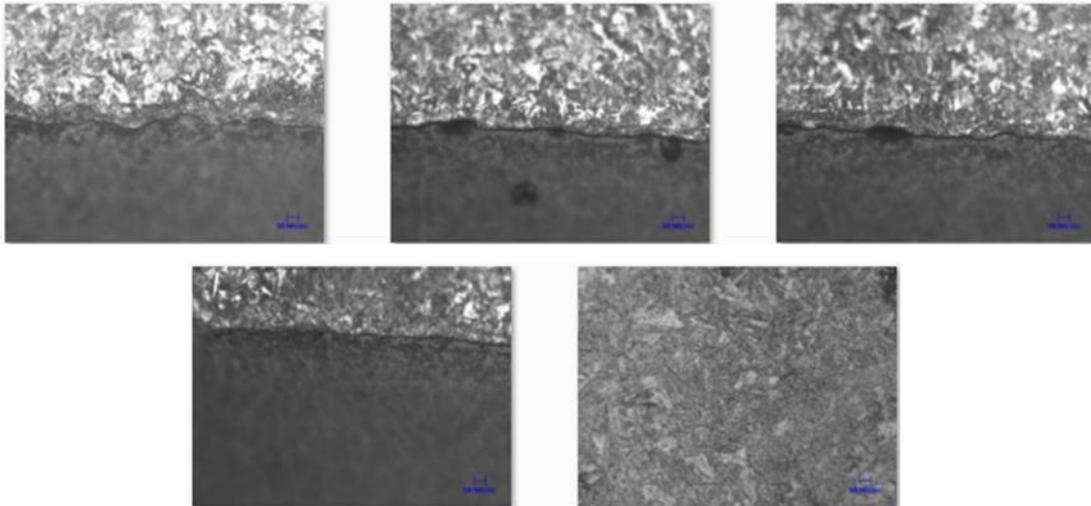
Microestructura Probeta 16 Termotrada. Superficie e Interior

GRUPO 3



Probeta #37 Recubierta con soldadura. La microestructura del borde es ledeburítica y en su mayoría uniforme. Crecimiento de los carburos de cromo en forma columnar o dendrítica. Las zonas del borde en donde hay carburos más grandes, es la más propensa a desprendimientos tempranos de material posterior a impactos sucesivos de las partículas erosivas.

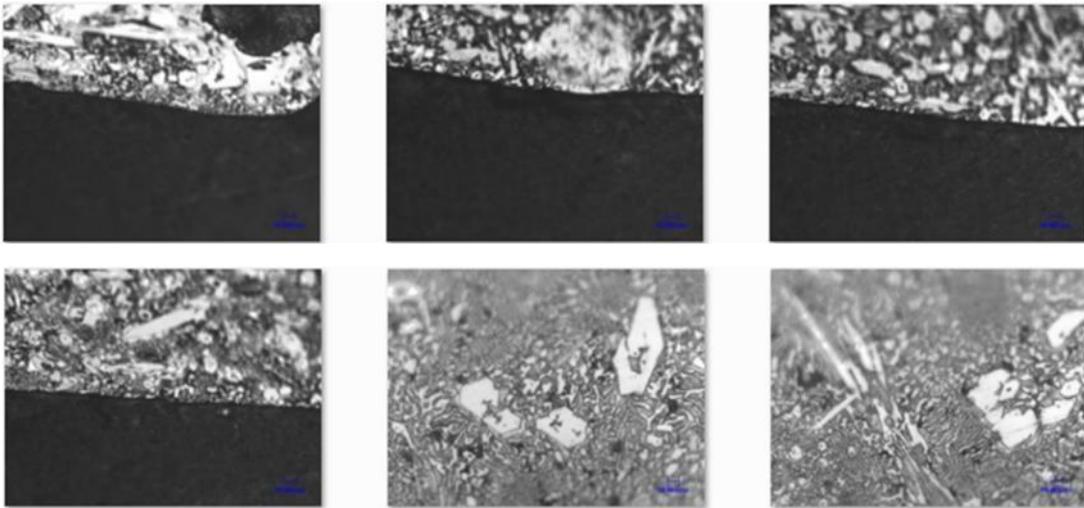
Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 37. Superficie e Interior



Probeta #16 Termotrada. Superficie de trabajo. Borde irregular por pérdida de material consistente con zonas microestructurales más blandas correspondientes con austenita. La microestructura martensítica/austenítica es uniforme tanto hacia el borde de trabajo como hacia el interior de la probeta.

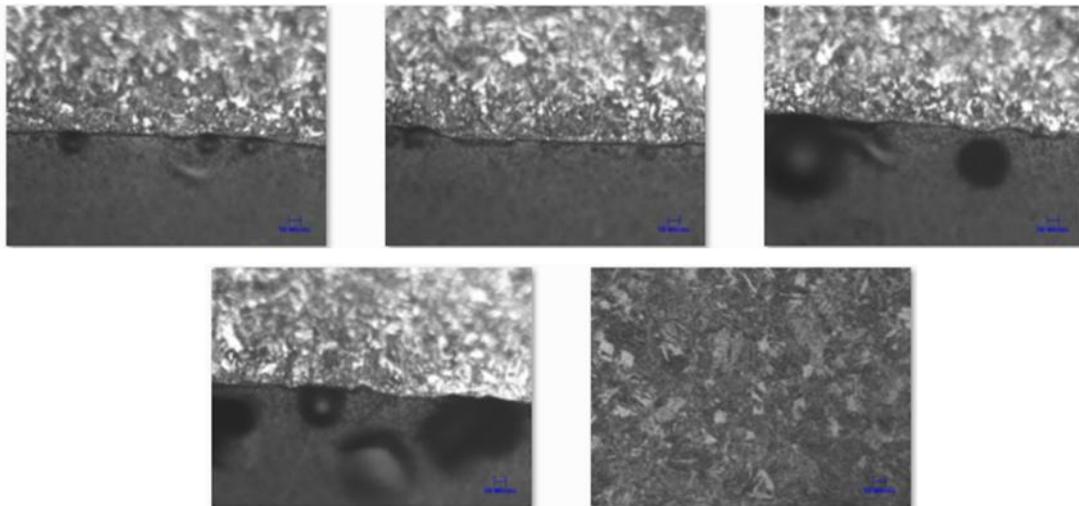
Microestructura Probeta 16 Termotrada. Superficie e Interior

GRUPO 4



Probeta #3 Recubierta con soldadura. La microestructura del corte transversal en la superficie de trabajo tiene carburos de cromo grandes hexagonales y alargados en una matriz martensítica. La alta acumulación de grandes carburos de cromo pueden facilitar la pérdida de material por microfractura. Hacia el interior del recubrimiento, la cantidad de carburos grandes es menor y se aprecia una microestructura ledeburítica en mayor proporción.

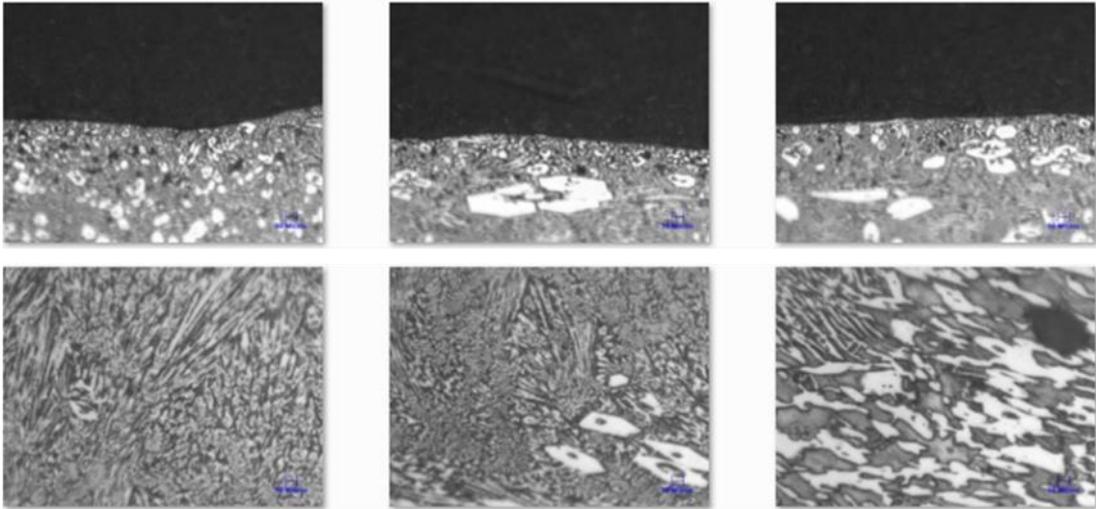
Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 3. Superficie e Interior



Probeta #18 Termotratada. Corte transversal de la probeta. El borde de trabajo es irregular y muestra desprendimiento de material en zonas de menor dureza de la microestructura que muestra martensita con austenita retenida y es uniforme tanto hacia el borde de trabajo como hacia el interior de la probeta.

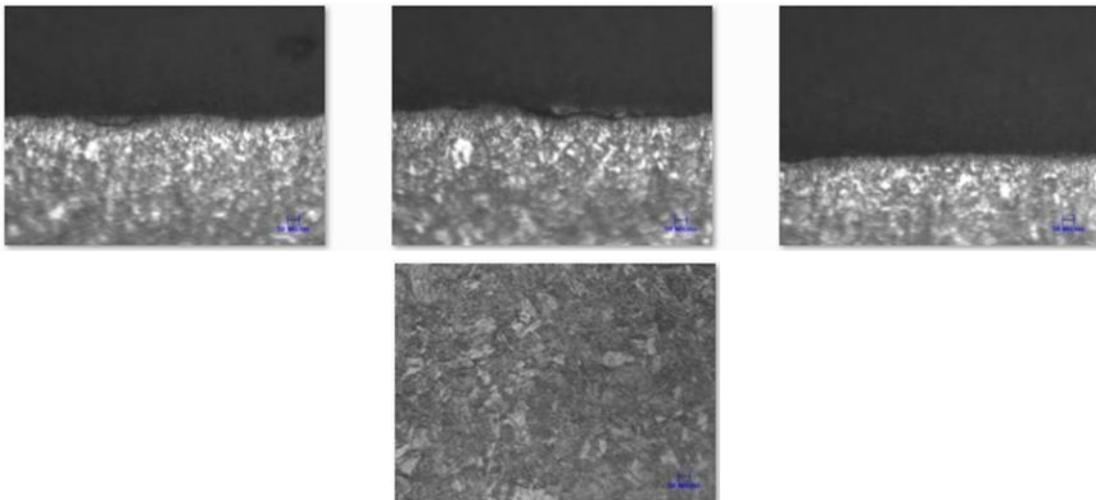
Microestructura Probeta 18 Termotratada. Superficie e Interior

GRUPO 5



Probeta #38 Recubierta con soldadura. La microestructura del corte transversal tanto de la superficie de trabajo como del cordón de recubrimiento es de carácter ledeburítico, con carburos de cromo grandes hexagonales y alargado en algunas sectores. Sobre el borde se mantiene una microestructura uniforme sin pérdidas de material localizadas

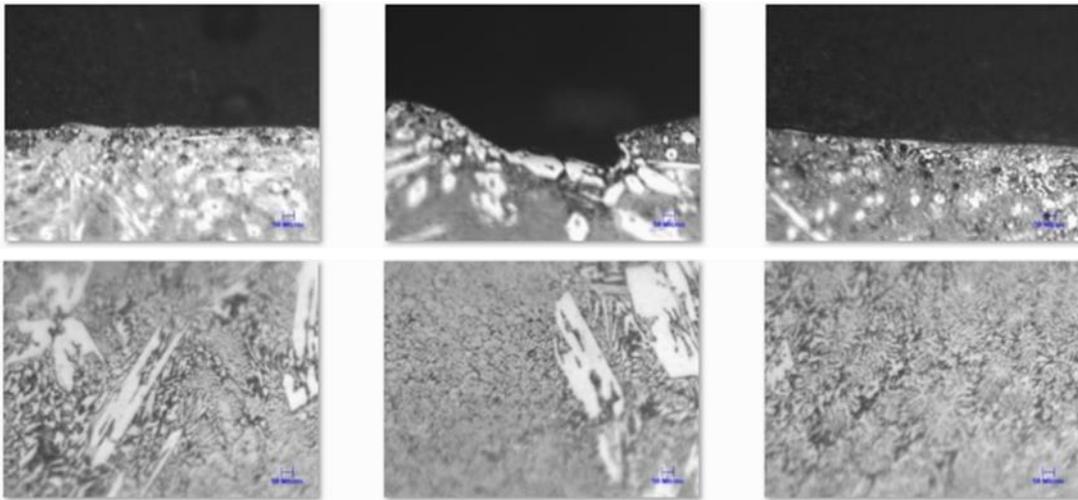
Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 38. Superficie e Interior



Probeta #51 Termotrada. Corte transversal de la probeta. Borde de trabajo irregular. Desprendimiento de material en zonas de menor dureza pues la microestructura muestra martensita con austenita retenida. La microestructura es uniforme tanto hacia el borde de trabajo como hacia el interior de la probeta.

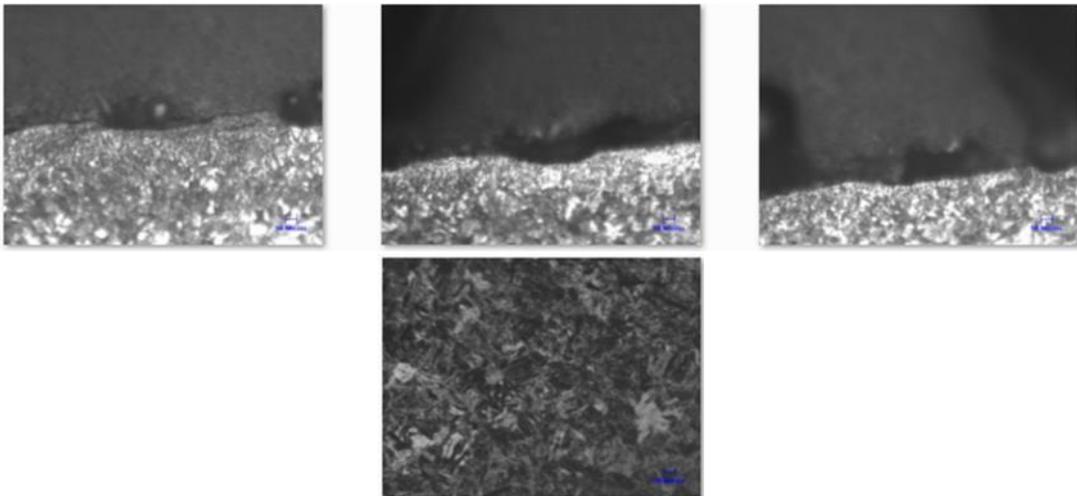
Microestructura Probeta 51 Termotrada. Superficie e Interior

GRUPO 8



Probeta #13 Recubierta con soldadura. La microestructura del corte transversal tanto de la superficie de trabajo como del cordón de recubrimiento muestra zonas de gran acumulación de carburos de cromo que facilitan remoción localizada de los mismos por microfractura luego de impactos sucesivos. Las zonas con carburos de menor tamaño y con microestructura más uniforme no evidencia pérdida de material.. Hacia el interior del recubrimiento se aprecia una estructura ledeburítica mucho más uniforme.

Microestructura Recubrimiento FE-C-Cr probeta 13. Superficie e Interior



Probeta #28 Termotrada. Corte transversal de la probeta. Borde de trabajo irregular por pérdida de material debido a la diferencias de dureza entre las fases de la microestructura que tiene predominancia de martensita con una proporción complementaria de austenita retenida, uniforme en toda la probeta

Microestructura Probeta 28 Termotrada. Superficie e Interior

Bibliografía

- [1] Ö. Genç a,* , A.H. Benzer, “Single particle impact breakage characteristics of clinkers related to mineral composition and grindability”. *Minerals Engineering* 22 (2009) 1160–1165.
- [2] J. Decasper. Holdenbank. Administración y Asesoría SA Process Technology. “Manual de Molinos para la Industria del Cemento”. Holderbank, Suiza.
- [3] Lucas R.D. Jensen a,* , Erling Fundal b , Per Møller c , Mads Jespersen, “Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills”. *Wear* 271 (2011) 2707–2719.
- [4] Bernal, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero, “Análisis próximo de arcillas para cerámica”. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 27 (105): 569-578, 2003. ISSN 0370-3908.
- [5] Horst-Michael Ludwig a,☒,Wensheng Zhang b, “Research review of cement clinker chemistry”. *Cement and Concrete Research* 78 (2015) 24–37.
- [6] Fassbender H. W., “Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica, 1994, 420p.
- [7] Tobón J. “Puzolanas en los alrededores de IRRRA” . *Dyna* 129 (2000) 77 – 83.
- [8] N. M Barkoula, J. Karger-Kocsis. “Processes and Influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites”. *Journal of Materials Science* 37. (2002) 3807-3820.
- [9] T. H. Tsiang, “Journal of composite Technology and Research” . 8(4) (1986) 154.

- [10] Treviño Álvaro M. "Desarrollo de una Metodología para Pruebas de Erosión". San Nicolás de los Garza, 2004. 35 p. Tesis (Maestro de ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales). Universidad Autónoma Nuevo León. División de estudios de post-grado.
- [11] H. Getu a, J.K.Spelt b,a, M.Papini. "Conditions leading to the embedding of angular and spherical particles during the solid particle erosion of polymers". *Wear* 292–293 (2012) 159–168.
- [12] A.P. Harsha *, Avinash A. Thakre. "Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites". *Wear* 262 (2007) 807–818.
- [13] G.W. Stachowiak and A. W. Batchelor, in "Engineering Tribology Tribology Series 24" (Elsevier, Amsterdam, 1993) p. 586.
- [14] M.M. Stack and N. Pungwiwat, "Slurry erosion of metallic, polymers, and ceramics: particle size effects". *Materials Science and Technology* 15 (1999) 337.
- [15] M. Papini, J.K. Spelt, "Impact of rigid angular particles with fully plastic targets- Part II: Parametric study of erosion phenomena, *International Journal of Mechanical Sciences*" 42 (5) (2000) 1007–1025.
- [16] S.M Walley, J.E. Field, "The erosion and deformation of polyethylene by solid- particle impact", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 321 (1987) 277–303.
- [17] H. Czinchos and K.H. Habig, *Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß*. (Friedr. Vieweg & Sohn Verlagge-sellschaft GmbH, Wiesbaden, 1992) p.128.
- [18] G.P.Tilly, *Wear* 14 (1969) 63.
- [19] Rao P. Veerabhadra and D. H. Buckley, *Asle Transactions* 29 (3) (1985) 283.
- [20] M.G. Gee*, C. Phatak, R. Darling. "Determination of wear mechanisms by stepwise erosion and stereological analysis". *Wear* 258 (2005) 412–425
- [21] S Victor, B Wylie, "Mecanica de Fluidos". Mc Graw Hill 1976 243,244.
- [22] <http://www.valvias.com/numero-de-reynolds.php>.
- [23] O. Levenspiel. Oregon State University. Corvalis, Oregon "Flujo de Fluidos, Intercambio de calor". .Editorial Reverté. 1996. España. ISBN 84-291-7968-2. 375p.

- [24] N. Miyazaki, S. Funakura. "Solid Particle erosion behavior of metal matrix composites". Journal of Composite materials, Vol 30, N° 15, 1996.
- [25] Gomez Ronald M. "Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos WC-Co micro y nanoestructurados", 2009, 124p Tesis de Maestría, ingeniería mecánica y de materiales. Universidad Politécnica de Valencia.
- [26] Sapate S.G., RamaRao A.V. "Erosive wear behavior of Weld harfacing high chromiun cast irons: effect of erodent particles". Tribology International, 39 (2006) 206 – 212
- [27] Ficha Técnica CDP 4666 – CastoDur Diamond Plates. Castolin Eutectic.
- [28] C. Marin Villar, "Aceros especiales antiabrasión, Una Batalla contra el desgaste". Revista Metal Actual. Edición 13. Agosto – Octubre 2009.
- [29] Tadeusz Hejwowski. "Erosive and abrasive wear resistance of overlay coatings". Vacuum 83 (2009) 166–170
- [30] Lalit Thakur, Navneet Arora. "A comparative study on slurry and dry erosion behaviour of HVOF sprayed WC–CoCr coatings". Wear 303 (2013) 405–411.
- [31] A.J. Gant , M.G. Gee. "Wear modes in slurry jet erosion of tungsten carbide hardmetals: Their relationship with microstructure and mechanical properties. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials" 49 (2015) 192–202.
- [32] A.P. Harsha a, U.S. Tewari a,*, B. Venkatraman. "Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites". Wear 254 (2003) 693–712.
- [33] Varga M, Widder L, Griesinger M, Adam K, Badisch E, "Wear progress and mechanisms in high temperature sieves", (2015), doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.032.
- [34] C. Katsich ☒, E. Badisch. Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions. Surface & Coatings Technology 206 (2011) 1062–1068.
- [35] C.E. Smeltzer, M. E. Gulden and W.A. Compton, "Journal of Basic Engineering" 19 (1970) 639.
- [36] J. K. Lancaster, Wear 141 (1990) 159.
- [37] Aptekar SS, Kosel TH. Erosion of white cast irons and stellite. Proceedings of international conference on wear of materials.: ASME;1985 p. 677–86

- [38] N. Miyazaki, S. Funakura. "Solid Particle erosion behavior of metal matrix composites". Journal of Composite materials, Vol 30, N° 15, 1996.
- [39] Cárdenas Quiroga Elsa Adriana, Morales Martín Luz Yolanda. b Ussa Caycedo. "La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento". Revista Científica General José María Córdova, Bogotá, Colombia, julio-diciembre, 2015 Ciencia y tecnología - Vol. 13, Núm. 16, pp. 201-219.
- [40] Yhama Valero Diego Alfonso. La imagen flotante: "Principios sobre estereoscopia". Pontificia Universidad Javeriana. 2010
- [41] Echeverry Olga, Vázquez Gerardo ".Introducción a la microscopia electrónica aplicada a las Ciencias Biológicas". Fondo de Cultura Económica. México D.F., México. 2000. 179p.
- [42] Alfonso J. Vázquez Baamonde, Juan J. de Damborenea González. "Ciencia e Ingeniería de la superficie de los materiales metálicos". Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid, España. 2000. 635p.
- [43] <https://es.wikipedia.org/wiki/Metalograf%C3%ADa>.
- [44] Salán Ballesteros Núria. "Tecnología de proceso y transformación de materiales". Ediciones UPC, Barcelona, España. 2005. 209p.
- [45] H.W. Hayden et al., "The Structure and Properties of Materials", Vol. III (John Wiley & Sons, 1965).
- [46] Kalpakjian Serope, Schmid Steven R., "Manufactura, ingeniería y tecnología". Cuarta edición. Ed Prentice Hall, México, 2002, 1176p.
- [47] Karl-Heinz Dietsche, "Manual de la técnica del automóvil", 4ª Edición. Robert Bosch GmbH. Ed Reverte. Alemania, 2005. 1213p.
- [48] Castañeda B. Jhon. "Evaluación de los métodos de hidrometalurgia, pirometalurgia y estabilización solidificación en el tratamiento de lodos procedentes de plantas de aguas residuales de procesos de cromado". Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Maestria en Materiales y Procesos. 2015. Página 40 de 149p.
- [49] M.C. Gutiérrez-Bouzán, R. Rodríguez-Urrioz "Detección de siliconas en tejidos defectuosos mediante espectrofotometría de FITR2. Boletín TEXTER (U.P.C.) 2010. Nº. 136.

- [50] <http://www.ssab.com/es/brands/hardox/>.
- [51] Tilly GP, Sage W. "The interaction of particle and material behaviour in erosion processes". *Wear* 1970;16:447–65.
- [52] Matthews S, James B., Hyland M., "The role of the mechanism of high velocity erosion of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings: Part 1 – As sprayed coatings. *Surface & Coatings Technology* 203 (2009) 1086 – 1093.
- [53] M.C. Carvalho, Y. Wang, J.A.S. Souza, E.M. Braga, L. Li. , "Characterization of phases and defects in chromium carbide overlays deposited by SAW process". *Engineering Failure Analysis* 60 (2016) 374-382
- [54] G.D. Nelson, G.L.F. Powell and V.M. Linton., " Investigation of the Wear Resistance of High Chromium White Irons". School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, South Australia, Australia.
- [55] C.-M. Lin, et al., "Effect of carbon content on solidification behaviors and morphological characteristics of the constituent phases in Cr–Fe–C alloys, *Mater. Charact.* v62 (2011) 1124–1133.
- [56] W. Kurz, D.J. Fisher, "Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publications", Switzerland, 1984.
- [57] E. Badisch, C. Katsich, H. Winkelmann, F. Franek, Manish Roy. "Wear behaviour of hardfaced Fe-Cr-C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature". *Tribology International* 43 (2010) 1234–1244.
- [58] G. Krauss. "Microstructures and properties of carburized steels, heat treating". *ASM Handbook*, vol. 4, ASM International (1991), pp. 363-375.
- [59] Vanessa F.C. Lins a, Jose´ R.T. Branco, Flavio R.C. Diniz, J.C. Brogan , Christopher C. Berndt, "Erosion behavior of thermal sprayed, recycled polymer and ethylene–methacrylic acid composite coatings". *Wear* 262 (2007) 274–281
- [60] Aptekar SS, Kosel TH. "Erosion of white cast irons and stellite". *Proceedings of international conference on wear of materials.:* ASME;1985 p. 677–86
- [61] Matthews S, James B., Hyland M., "The role of the mechanism of high velocity erosion of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings: Part 2 – Heat treated coatings. *Surface & Coatings Technology* 203 (2009) 1094–1100

- [62] Chatterjee S, Pal TK. "Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron" *Wear* 2003;255:417–25.
- [63] Powell GLF, Carlson RA, Randle V. "The morphology and microtexture of M7C3 carbides in Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Si alloys of near eutectic composition". *J Mater Sci* 1994;29:4889–96
- [64] S.S.F. Dafé, D.R. Moreira, M.S. Matoso, B.M. Gonzalez, D.B. Santos., " Martensite formation and recrystallization behavior in 17Mn0.06C2Si3Al1Ni TRIP/TWIP steel after hot and cold rolling." *Mater. Sci. Forum*, 753 (2013), pp. 185-190
- [65] Ojala N, Valtonen K, Heino V, Kallio M, Aaltonen J, Siitonen P, KuoKKala V., "Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels". *Wear*, Volume 317, Issues 1–2, 15 September 2014, Pages 225-232
- [66] A. Lesko, E. Navara," Microstructural characterization of high carbon ferrochromium, *Mater. Charact*". v36 (1996) 249–356.
- [67] I. Finnie, *The Mechanisms of Erosive Wear in Ductile Metals, Corrosion-Erosion Behavior of Materials*, K. Natesan, Ed., TMS-AIME, 1980, 118-126
- [68] Thomas H. Kosel, (1992). *Solid Particle Erosion*, ASM Handbook, Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM International, v18, 199 213.
- [69] I.M. Hutchings, R.E. Winter, and J.E. Field, *Solid Particles Erosion of Metals: The Removal of Surface Material by Spherical Projectiles*, *Proc. R. Soc. (London) A*, Vol 348, 1976, p 379-392
- [70] I.M. Hutchings, *Deformation of Metal Surfaces by the Oblique Impact of Square Plates*, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol 19, 1977, p 45-52
- [71] R.E. Winter and I.M. Hutchings, *Solid Particles Erosion Studies Using Single Angular Particles*, *Wear*, Vol 29, 1974, p 181-194
- [72] I.M. Hutchings, *Mechanisms of the Erosion of Metals by Solid Particles*, *Erosion: Prevention and Useful Applications*, STP 664, ASTM, 1979, p 59-76
- [73] I. Finnie, A.V. Levy, and D.J. McFadden, *Fundamental Mechanisms of the Erosive Wear of Ductile Metals by Solid Particles*, *Erosion: Prevention and Useful Applications*, STP 664, ASTM, 1979, p 36-58
- [74] T.H. Kosel, A.P.L. Turner, and R.O. Scattergood, *Effects of Particle Size and Shape on Erosive Wear Mechanisms*, in *Corrosion-Erosion Behavior of Materials*, TMS-AIME, 1980, p 146-161
- [75] I. Finnie, *Erosion of Metals*, *Proceedings of Conference on Corrosion/Erosion of Coal Conventional System Materials*, National Association of Corrosion Engineers, 1979, p 429-443

- [76] R.A. Mayville, "Mechanism of Material Removal in the Solid Particle Erosion of Ductile Metals," M.S. thesis, University of California--Berkeley, 1978
- [77] R. Bellman, Jr. and A. Levy, Platelet Mechanism of Erosion of Ductile Metals, Proceedings of International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, 1981, p 564- 576
- [78] J.G.A. Bitter, A Study of Erosion Phenomena, Part I, Wear, Vol 6, 1963, p 5-21
- [79] J.G.A. Bitter, A Study of Erosion Phenomena, Part II, Wear, Vol 6, 1963, p 169-190
- [80] I.M. Hutchings, R.E. Winter, and J.E. Field, Solid Particles Erosion of Metals: The Removal of Surface Material by Spherical Projectiles, Proc. R. Soc. (London) A, Vol 348, 1976, p 379-392
- [81] D.G. Rickerby and N.H. Macmillan, Erosion of Aluminum and Magnesium Oxide by Spherical Particles, Proceedings of International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, 1981, p 548-563
- [82] D.G. Rickerby and N.H. Macmillan, On the Oblique Impact of a Rigid Sphere Against a Rigid-Plastic Solid, Int. J. Mech. Sci., Vol 22, 1980, p 491-494
- [83] I.M. Hutchings, D.G. Rickerby, and N.H. Macmillan, Further Studies of the Oblique Impact of a Hard Sphere Against a Ductile Solid, Int. J. Mech. Sci., Vol 23, 1981 p 639-646
- [84] A. Misra and I. Finnie, On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear, Wear, Vol 65, 1981, p 359-373
- [85] N. Gane and J.M. Cox, The Microhardness of Metals at Very Low Loads, Philos. Mag., Vol 22, 1970, p 881-891
- [86] N. Gane, The Direct Measurement of the Strength of Metals on a Sub-Micrometer Scale, Proc. R. Soc. (London) A, Vol 317, 1970, p 367-391
- [87] K. Wellinger and H. Uetz, Gleit-Spül and Strahlverschleiss Prüfung, Wear, Vol 1, 1957-58, p 225-231
- [88] 48. K. Anand, S.K. Hovis, H. Conrad, and R.O. Scattergood, Flux Effects in Solid Particles Erosion, Wear, Vol 118, 1987, p 243-257
- [89] G.A. Sargent, M.K. Keshavan, P.K. Mehrotra, and H. Conrad, The Erosion of Plain Carbon Steels by Ash Particles From a Coal Gasifier, Proceedings of International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, 1981, p 613-618
- [90] J. Salik and D.H. Buckley, Effects of Erodent Particle Shape and Various Heat Treatments on Erosion Resistance of Plain Carbon Steels, Technical Paper 1755, National Aeronautics and Space Administration, 1981

[91] A.V. Levy and S. Jahanmir, The Effects of the Microstructure of Ductile Alloys on Solid Particle Erosion Behavior, in Corrosion-Erosion Behavior of Materials, TMS-AIME, 1980, p 177-189

[92] L.G. Peterson, G.A. Sargent, and H. Conrad, Effect of Microstructure on the Erosion of Steel by Solid Particles, Proceedings of International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, 1985, p 661-670

[93] ASTM C 430-96 " Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by 45 μ m (N°325) sieve" 2003.

[94] Jenney Cynthia, O'Brien Annette. "Welding Handbook" 9 Edición, Volumen 1. American Welding Society, Miami, Estados Unidos de América. 2001. 4113p.

[95] Y.A. Cengel, J.M. Cimbala, Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones, 1ª edición, McGraw Hill, 2006, Tabla A-9