

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO Y EROSIVO DE RECUBRIMIENTOS TIPO CERMET DEPOSITADOS POR HVOF

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.:
Galarraga G., Michael X.
González F., Fernando
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO Y EROSIVO DE RECUBRIMIENTOS TIPO CERMET DEPOSITADOS POR HVOF

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. María Rodríguez de Prato

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.:
Galarraga G., Michael X.
González F., Fernando
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

DEDICATORIA

Por supuesto que a mis padres, por estar siempre a mi lado.

A mis dos hermanos que a pesar de tener en algunos momentos diferencias los quiero igual.

A mi novia por escucharme siempre en mis momentos difíciles.

Y finalmente este trabajo me lo dedico a mí, por tener fuerza y no caer en los momentos difíciles de la vida, y para así lograr uno de mis grandes sueños, ser Ingeniero Mecánico.

Michael.

Este Trabajo de Grado representa una de mis metas más ambiciosas, el hecho de ser un profesional fue un día un sueño y hoy se ha convertido en una realidad.

Son numerosas las personas que a lo largo de mi vida me han inculcado la importancia de ser un hombre de bien, una persona capaz de luchar por sus ideales manteniendo siempre el respeto hacia los de los demás, un ser que de forma incansable buscará mejorar día a día. Le dedico entonces mi esfuerzo a mi mamá, “Puri”, quien siempre estuvo allí para ayudarme, soportarme y darme el apoyo que necesité, mamá eres única; a mi Abuelo, “Kike”, quien es para mí un modelo ejemplar a seguir, por ti doy mi vida, esto es para ti; a mi Abuela, “Rocío”, quien me enseñó los buenos modales, el respeto y el valor de la vida; y a una personita muy especial que me ha acompañado durante toda mi carrera, “Male”, esto es también para ti, gracias por acompañarme siempre, espero tenerte toda la vida a mi lado, no solo como amiga sino como la mujer que aprecio, respeto y amo. Gracias a todos.

Quiero incluir dentro de mis agradecimientos, y en un lugar especial, a todos esos Profesores que me brindaron una mano amiga, a esta Universidad que sin distinguir raza ni clase me permitió ingresar a sus aulas y me entregó una formación profesional que llevaré con mucho orgullo durante el resto de mi vida. Gracias U.C.V.

Fernandito

AGRADECIMIENTOS

Nos complace reconocer de forma muy especial a nuestra tutora, la Profesora Ingeniero María de Prato, quien siempre nos supo guiar hacia la solución de los problemas que se nos presentaban en el largo trayecto que implica la elaboración de un trabajo como este. Sinceramente gracias, por brindarnos todo su apoyo, regalarnos día a día un trocito de su tiempo y entregarnos siempre un consejo que nos inspirara a seguir adelante.

Queremos también agradecer al Profesor Ingeniero Andrea Scagni, que nos brindó toda la colaboración posible para poder llevar a cabo el proceso de rociado térmico, poniendo a nuestra disposición los equipos de su empresa *Plasmatec Ingenieros*.

Un agradecimiento muy especial para el profesor Ingeniero Crisantos Villalobos por brindarnos toda la ayuda necesaria para la realización de nuestro trabajo, esperamos que siga siendo para con todos sus estudiantes una persona tan carismática y sencilla como lo ha sido con nosotros. Sinceramente Muchas Gracias.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, quienes nos permitieron el uso de los equipos para el tamizado de las arenas y nos ayudaron en la preparación de las muestras para realizar la microscopía electrónica de barrido.

Al *IUT* por toda la colaboración prestada para la realización de la Microscopía Electrónica de Barrido, y especialmente al Prof. Freddy Arenas, sin su ayuda no hubiese sido posible la culminación de nuestro trabajo.

Al Ing. Jorge Schell, gerente de la empresa *Gomainca*, quien puso a nuestra disposición toda la ayuda que pudiéramos requerir y se mantuvo siempre en contacto con nosotros.

Al Lic. Luis López, perteneciente a la empresa *Rias C.A.*, quien nos ayudó a la adquisición de la arena de cuarzo redondeado para poder realizar los ensayos abrasivos.

Al Profesor Ingeniero Juan Carlos Mestre por brindarnos la ayuda necesaria para la realización del trabajo.

Gracias por siempre, a nuestras familias, compañeros y amigos que nos impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles durante este trabajo así como durante toda la carrera, de no ser por Uds. no estaríamos hoy en el lugar que estamos.

Por aquello de que *los últimos serán los primeros*, Gracias a Dios, por permitirnos ser quienes somos y por darnos: una vida y un motivo para vivirla, una familia y un hogar, un montón de gente que nos aprecia y nos impulsa a ser cada día mejores, y una memoria para tener siempre presentes a todas esas personas especiales que tanto queremos.

Gracias a la *Universidad Central de Venezuela*, por permitirnos vencer las sombras de lo desconocido abriendo las ventanas del conocimiento. No tendremos tiempo en la vida para retribuir a quien nos formó y nos dio las herramientas para tallar nuestro futuro.

RESUMEN

Galarraga G., Michael X.

González F., Fernando

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO Y EROSIVO DE RECUBRIMIENTOS TIPO CERMET DEPOSITADOS POR HVOF.

Tutor Académico: Prof. Ing. María Rodríguez de Prato. Tesis. Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002, 101 Págs.

Palabras claves: Rociado Térmico, HVOF, Tratamiento Térmico posterior.

El objetivo de este trabajo fue determinar la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de recubrimientos depositados por la técnica de HVOF (High Velocity Oxigen Fuel).

El sustrato utilizado fue un acero AISI 1020. Sobre éste fueron depositados, utilizando como material de alimentación una mezcla metálica, dos tipos de recubrimientos, los cuales son: el 20%(WC-12%Co)+80%Colmonoy 88[®] y una aleación de (WC-10%Co)+4%Cr. A un grupo de probetas recubiertas con la mezcla (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®], se le realizó un tratamiento térmico con llama oxiacetilénica, a fin de modificar las propiedades mecánicas del material y así realizar luego un estudio comparativo entre el recubrimiento tratado y el no tratado térmicamente.

Una vez realizada la deposición se procedió a evaluar. Los parámetros utilizados en el ensayo de erosión fueron tres ángulos (30, 60 y 90°) y tres tiempos (3, 6 y 9min), en el caso del ensayo de abrasión se utilizaron 3 tiempos (5, 10 y 30 min).

Se pudo determinar a través de nuestro estudio que el tratamiento térmico posterior mejoró la resistencia al desgaste abrasivo hasta en un 51 % y al erosivo en un 142 %.

El Acero fue más resistente al desgaste erosivo que cualquiera de los recubrimientos estudiados. Entre los recubrimientos el mejor comportamiento al desgaste abrasivo y erosivo fue el del (WC-10%Co)+4%Cr

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESÚMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XV
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO	8
1.1.- ROCIADO TÉRMICO	8
1.1.1.- Rociado térmico por arco eléctrico	9
1.1.2.- Rociado térmico por medio de pistola de plasma	10
1.1.3.- Rociado térmico por llama.	11
1.2.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS	13
1.2.1.-Tipos de tratamientos térmicos	13
1.3.- DESGASTE	15
1.3.1.- Desgaste Adhesivo	16
1.3.2.- Desgaste por Fatiga	17
1.3.3.- Desgaste Corrosivo	17
1.3.4.- Desgaste Abrasivo	17

1.3.5.- Desgaste Erosivo	22
1.4.- MATERIALES	31
CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	34
2.1.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	34
2.2.- MATERIAL DE LAS PROBETAS	35
2.3.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ROCIADO TÉRMICO	37
2.4.- PARÁMETROS DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO	37
2.5.- TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR	38
2.6.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS PREVIO A LOS ENSAYOS	40
2.7.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB), MICRODUREZA Y RUGOSIDAD	42
2.7.1.- Preparación de las muestras	42
2.7.2.- Descripción de los equipos	43
2.8.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD	46
2.8.1.- Método de las dimensiones	46
2.8.2.- Método de la inmersión	46
2.8.3.- Método de la inmersión del recubrimiento	47
2.8.4.- Método de la Microscopía Electrónica	47
2.9.- ENSAYO DE EROSIÓN	48
2.9.1.- Cálculos realizados para el ensayo de erosión	51
2.10.- ENSAYO DE ABRASIÓN	52

2.10.1.- Cálculos realizados para el ensayo de abrasión	58
CAPÍTULO III	
ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
3.1.- ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD	60
3.2.- ANÁLISIS DE LA MEB (MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO)	61
3.3.- ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE LOS DISTINTOS RECUBRIMIENTOS	70
3.4.- ANÁLISIS DE LA MICRODUREZA	71
3.5.- ENSAYO DE EROSIÓN	73
3.6.- ENSAYO DE ABRASIÓN	86
3.7.- ANÁLISIS DE LA MEB DE LA SUPERFICIES ENSAYADAS	89
CAPÍTULO IV	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1.- CONCLUSIONES	96
4.2.- RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1.- Estructura morfológica de un recubrimiento por rociado térmico	8
Figura N° 1.2.- Dispositivo para rociado térmico por arco eléctrico	10
Figura N° 1.3.- Dispositivo para termo rociado por plasma	11
Figura N° 1.4.- Dibujo esquemático de la pistola de HVOF	13
Figura N° 1.5.- Influencia del contenido de carbono sobre la resistencia a la abrasión	19
Figura N° 1.6.- Variación de la erosión dependiendo del tipo de material	24
Figura N° 1.7.- Modelo de indentación rígido-plástico	27
Figura N° 1.8.- Tipos de deformaciones producidas por el impacto de las partículas	28
Figura N° 2.1.- Diagrama de flujo del procedimiento experimental	35
Figura N° 2.2.- Medidas de las probetas a utilizar por ensayo	36
Figura N° 2.3.- Aplicación de rociado térmico	38
Figura N° 2.4.- Fijación de probetas	39
Figura N° 2.5.- Aplicación del tratamiento térmico	39
Figura N° 2.6.- Centro de Mecanizado de la E.I.M. U.C.V.	41
Figura N° 2.7.- Balanza Analítica	41
Figura N° 2.8.- Desecador	41
Figura N° 2.9.- Cortadora de precisión	42
Figura N° 2.10.- Probetas embutidas y pulidas	43

Figura N° 2.11.- Equipo de desbaste y pulitura	43
Figura N° 2.12.- Microscopio electrónico de barrido	44
Figura N° 2.13.- Microdurómetro	45
Figura N° 2.14.- Rugosímetro	45
Figura N° 2.15.- Tamizadora de precisión	49
Figura N° 2.16.- Equipo de ensayo erosivo y sus partes	51
Figura N° 2.17.- Tamizadora industrial. Tomado de los autores.	54
Figura N° 2.18.- Máquina de Ensayo Abrasivo	57
Figura N° 3.1.- Valores de la rugosidad para los diversos materiales en μm .	61
Figura N° 3.2.- MEB. Recu I, aumento 50x. Tomado de los autores.	62
Figura N° 3.3.- MEB. Recu I, aumento 500x. Tomado de los autores.	62
Figura N° 3.4.- MEB. Recu I, aumento 1500x. Tomado de los autores.	63
Figura N° 3.5.- MEB. Recu I, análisis químico del detalle A indicado sobre el aumento 1500x. Tomado de los autores.	63
Figura N° 3.6.- MEB. Recu I, aumento 2000x. Tomado de los autores.	64
Figura N° 3.7.- MEB. Recu I TT, aumento 50x. Tomado de los autores.	64
Figura N° 3.8.- MEB. Recu I TT, aumento 500x. Tomado de los autores.	65
Figura N° 3.9.- MEB. Recu I TT, análisis químico del detalle indicado sobre el aumento 500x. Tomado de los autores.	65
Figura N° 3.10.- MEB. Recu I TT, aumento 2000x. Tomado de los autores.	66
Figura N° 3.11.- MEB. Recu I TT, análisis químico del detalle A indicado sobre el aumento 2000x. Tomado de los autores.	66
Figura N° 3.12.- MEB. Recu II, aumento 50x. Tomado de los autores.	67
Figura N° 3.13.- MEB. Recu II, aumento 500x. Tomado de los autores.	67
Figura N° 3.14.- MEB. Recu II, aumento 1500x. Tomado de los autores.	68

Figura N° 3.15.- MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado sobre el aumento 1500x. Tomado de los autores.	68
Figura N° 3.16.- MEB. Recu II, aumento 2000x. Tomado de los autores.	69
Figura N° 3.17.- MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado (zona gris clara) sobre el aumento 2000x. Tomado de los autores.	69
Figura N° 3.18.- MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado (zona gris oscura) sobre el aumento 3000xb. Tomado de los autores.	70
Figura N° 3.19.- Densidad de los diferentes materiales utilizados.	71
Figura N° 3.20.- Valores de dureza Vickers para los materiales estudiados.	72
Figura N° 3.21.- Comparación entre Microdureza y densidad de los recubrimientos estudiados.	73
Figura N° 3.22.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 45°.	74
Figura N° 3.23.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 60°.	75
Figura N° 3.24.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 90°.	75
Figura N° 3.25.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.	76
Figura N° 3.26.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.	77
Figura N° 3.27.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.	77
Figura N° 3.28.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados en 45°.	79
Figura N° 3.29.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados en 60°.	79
Figura N° 3.30.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados en 90°.	79

Figura N° 3.31.- Comparación entre el desgaste erosivo y densidad de los recubrimientos estudiados.	
81	
Figura N° 3.32.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.	81
Figura N° 3.33.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.	81
Figura N° 3.34.- Tasa de erosión en mm ³ /gramos de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.	81
Figura N° 3.35.- Comparación entre el desgaste erosivo y la microdureza de los recubrimientos estudiados.	82
Figura N° 3.36.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados en 45°.	83
Figura N° 3.37.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados en 60°.	84
Figura N° 3.38.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados en 90°.	84
Figura N° 3.39.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.	85
Figura N° 3.40.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.	85
Figura N° 3.41.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.	85
Figura N° 3.42.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados.	87
Figura N° 3.43.- Pérdida volumétrica corregida en mm ³ de los diferentes materiales ensayados	88
Figura N° 3.44.- Comparación entre el desgaste abrasivo y densidad de los recubrimientos estudiados.	89
Figura N° 3.45.- MEB de la superficie. Recu I. 9min, 90°, 50x. Erosión.	90

Figura N° 3.46.- MEB de la superficie. Recu I. 9min, 90°, 500x. Erosión.	90
Figura N° 3.47.- MEB de la superficie. Recu I TT. 9min, 90°, 50x. Erosión.	91
Figura N° 3.48.- MEB de la superficie. Recu I TT. 9min, 90°, 500x. Erosión.	91
Figura N° 3.49.- MEB de la superficie. Recu II. 9min, 90°, 50x. Erosión.	91
Figura N° 3.50.- MEB de la superficie. Recu II. 9min, 90°, 500x. Erosión.	91
Figura N° 3.51.- MEB de la superficie. Recu I. 30min, 50x. Abrasión.	92
Figura N° 3.52.- MEB de la superficie. Recu I. 30min, 500x. Abrasión.	92
Figura N° 3.53.- MEB de la superficie. Recu I TT. 30min, 50x. Abrasión.	93
Figura N° 3.54.- MEB de la superficie. Recu I TT. 30min, 500x. Abrasión.	93
Figura N° 3.55.- MEB de la superficie. Recu II. 30min, 50x. Abrasión.	93
Figura N° 3.56.- MEB de la superficie. Recu II. 30min, 500x. Abrasión.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados	26
Tabla 1.2.- Variación del número de Best con el tipo de daño	25
Tabla 1.3.- Composición química del Colmonoy 88	32
Tabla 2.1.- Nomenclatura empleada para la identificación de los materiales Estudiados	36
Tabla 2.2.- Número de probetas y de ensayos requeridos para el desarrollo de la Investigación	36
Tabla 2.3.- Parámetros para recubrimiento 20%(WC-12%Co)+ 80%Colm 88	38
Tabla 2.4.- Parámetros para recubrimiento 96%(WC-10%Co)+4%Cr	38
Tabla 2.5.- Medición de la granulometría de la alúmina	49
Tabla 2.6.- Granulometría de la arena según Norma	53
Tabla 2.7.- Resultados del tamizado. Granulometría de la arena	54
Tabla 2.8.- Composición química de la banda de desgaste abrasivo	55
Tabla 2.9.- Resultados obtenidos para la verificación del flujo de arena	55
Tabla 2.10.- Valores de carga en función del tipo de ensayo	56
Tabla 3.1.- Valores de la rugosidad para los diversos materiales en μm .	60
Tabla 3.2.- Densidad en gr/mm^3 de los diferentes materiales utilizados.	71
Tabla 3.3.- Valores de la dureza para los materiales estudiados.	72
Tabla 3.4.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales en erosión.	73
Tabla 3.5.- Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales en erosión.	78
Tabla 3.6.- Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales en erosión.	83
Tabla 3.7.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales en abrasión.	86

Tabla 3.8.- Pérdida volumétrica corregida en mm^3 de los diferentes materiales en abrasión.	88
--	----

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años la tecnología de los materiales ha ido avanzando de manera sobresaliente hacia productos de mejor calidad y por lo tanto necesita cada vez más de elementos sofisticados para la elaboración de bienes acabados. La incursión de nuevas técnicas para la obtención de materiales de alto rendimiento es un hecho palpable que inspira a las nuevas generaciones hacia un ambiente futurista que parecía inalcanzable.

Las guerras, los avances científicos, los infortunados accidentes y la misma ambición del hombre sirve como combustible para hacer que el ingenio funcione a niveles impredecibles, obteniendo en muchos casos soluciones maravillosas con altas prestaciones tecnológicas y con requerimientos sumamente elevados en cuanto a calidad y bajo costo, con el fin de satisfacer los más exquisitos y variados gustos. Es por eso que cada vez se intensifica más la necesidad de mejorar los materiales con los que trabajamos día a día.

Para tal fin se han diseñado diversos métodos que permiten obtener materiales con altos rendimientos en cuanto a resistencia y durabilidad. A pesar de que los cambios generados en el material por cada uno de ellos son muy diferentes, algunos de los métodos empleados para la modificación de las propiedades de los materiales son: rociado térmico, aplicación de trabajo en frío y en caliente, diversos modos de tratamientos térmicos, etc.

El efecto desgaste puede definirse como un fenómeno mediante el cual se genera un desprendimiento de partículas pertenecientes a la superficie de un cuerpo. También se considera desgaste al desplazamiento de material a partir de la zona de contacto entre dos elementos hacia sectores libres de carga. El desgaste es un efecto inevitable para cualquier situación en la que existan cargas aplicadas sobre superficies que presenten movimiento relativo entre sí. Por lo general, el desgaste trae como consecuencia la disminución en el rendimiento de los equipos mecánicos debido al aumento de la fricción, la temperatura de trabajo, el consumo de lubricantes, el incremento del

requerimiento energético, etc.; lo cual representa una clara evidencia de su presencia en los elementos de máquina. Cuando por una u otra circunstancia esas advertencias de falla no se toman en cuenta el efecto desgaste puede ser un fenómeno fatídico para el sistema en lugar de representar un simple reemplazo de piezas de sacrificio tales como bujes o rodamientos entre muchos otros.

Entre los procesos existentes para la recuperación de piezas desgastadas el más empleado es la soldadura. Sin embargo, su aplicación resulta en ciertos casos riesgosa debido a los cambios tanto micro-estructurales como dimensionales generados por las altas temperaturas durante la operación de soldeo, formando en la superficie la denominada zona afectada por el calor, que no es mas que el sector sobre el cual las temperaturas han alcanzado valores considerables como para lograr la modificación de las propiedades del material. Algunas otras técnicas empleadas para la reparación de piezas son: la inmersión, la electro-deposición y la implantación iónica.

La búsqueda de la disminución del efecto desgaste ha llevado al hombre hacia la aplicación de técnicas de recubrimiento mediante las cuales materiales simples obtienen propiedades superficiales sumamente sofisticadas que les brindan excelentes prestaciones mecánicas. Uno de los métodos más utilizados es el rociado térmico, el cual consiste en la proyección de partículas de un determinado material, cuyas propiedades son óptimas para una aplicación específica, sobre un sustrato o material base común. Las partículas proyectadas pueden o no ser de tipo metálico y se depositarán sobre el sustrato en condición fundida o semi-fundida gracias a las condiciones de salida que se obtienen a partir del equipo de proyección. Para realizar procesos de rociado térmico se emplea por lo general un sistema compuesto por una pistola de rociado, una fuente de poder o una consola para el control del gas y un alimentador del material a depositar bien sea polvo o un alambre continuo.

Por medio de este Trabajo Especial de Grado deseamos adquirir todos los conocimientos posibles en relación a los procesos de recubrimiento de materiales, específicamente mediante el sistema High Velocity Oxygen Fuel (HVOF). Estudiaremos los efectos sobre la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de piezas

recubiertas por dicho método. Todo esto con la finalidad de otorgar al final del procedimiento una plantilla de resultados que permita visualizar las cualidades de los recubrimientos.

La capacidad del método HVOF para producir recubrimientos de alta calidad en lo que se refiere a porosidad, contenido de óxido, densidad y dureza (Wang, 1995) ha impulsado el crecimiento de éste como método predilecto para la reparación de numerosas piezas en industrias tan importantes como la petrolera y la del papel.

En diversas aplicaciones una pequeña disminución en la tasa de desgaste implica una reducción directa de los costos por mantenimiento bastante considerable. Es por ello que los denominados recubrimientos endurecedores entre los que se encuentra el carburo de tungsteno combinado con elementos como cobalto, níquel y cromo, representan un papel primordial en el desarrollo industrial.

ANTECEDENTES

En la literatura revisada encontramos algunos trabajos relacionados con el presente estudio que sirven de base para el desarrollo de la investigación.

Bangueses y Rodríguez (2.000) utilizaron dos recubrimientos (WC-12%Co)+20%Colmonoy 88[®] y (WC-10%Co)+4%Cr, los cuales fueron depositados mediante la técnica HVOF, al primero también se le realizó un tratamiento térmico posterior por llama oxiacetilénica. Evaluaron la resistencia a la erosión para diferentes ángulos de incidencia (30°, 45° y 60°) siguiendo la norma ASTM G76-83. Determinaron que el recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr tuvo mayor resistencia al desgaste que los otros dos y también concluyeron que la microdureza superficial no se altera con la aplicación del tratamiento térmico, sin embargo, la resistencia al desgaste erosivo aumentó.

Pinto y Rangel (1.999) basaron su trabajo en el ensayo de abrasión según la norma ASTM G65-C. El ensayo consistió en clasificar el rango de materiales ensayados en un orden de méritos similar al que ocurría en un ambiente abrasivo. Los materiales evaluados fueron un acero comercial AISI 4340 templado 52-54 RC y dos recubrimientos depositados por HVOF. Los materiales rociados térmicamente fueron Carburo de Tungsteno con 12% de Cobalto (WC-12%Co) y Colmonoy 88[®] (NiWCrBSi) y fueron aplicados sobre un acero AISI 4340. Concluyeron que la resistencia del recubrimiento de Carburo de Tungsteno (WC-12%Co) fue 15 veces mayor que la del acero base, y la del Colmonoy 88[®] fue un 50% mayor que la del acero.

García y Redden (1.998) estudiaron la resistencia al desgaste erosivo, bajo cuatro ángulos de incidencia (15°, 30°, 60° y 90°), de un recubrimiento con aleación Colmonoy 88[®] como rociado y con tratamiento térmico posterior con llama oxiacetilénica. Determinaron que la microdureza superficial y la resistencia al desgaste erosivo aumentaron con la aplicación del tratamiento térmico.

Lathabai y colaboradores (1.998) estos investigadores utilizaron 3 tipos de recubrimientos: cerámico, metálico y polímero, a los cuales se les realizaron ensayos erosivos utilizando SiC y SiO₂ como erodantes por un período de 5 horas. Por medio de estos ensayos lograron obtener varios resultados importantes, y concluyeron que mientras mayor es el ángulo de incidencia de las partículas erosivas sobre el sustrato el desgaste erosivo será mayor para los materiales cerámicos, también que los rangos de erosión aumentan proporcionalmente con el aumento de la velocidad de las partículas erosivas y que los recubrimientos tipo metálico y polímero presentan una alta pérdida de material en bajos ángulos de incidencia del erosivo (30°).

Malaver y Barbera (1.995) realizaron una evaluación de la resistencia al desgaste por erosión de tres materiales rociados térmicamente (Cr₃C₂, WC-16%Co y Colmonoy 88[®]) por la técnica de HVOF, utilizando como material base un acero AISI 1020. Concluyeron que el Carburo de Cromo Cr₃C₂ tuvo un 40% menor pérdida de peso que el Colmonoy 88[®] y que el acero base tuvo un 50% mejor resistencia a la erosión que el Colmonoy 88[®].

Wang B. Q. (1.995) realizó una comparación entre cuatro recubrimientos y un acero AISI 1018, para observar el comportamiento de estos en ensayos erosivos a altas temperaturas. Los recubrimientos utilizados fueron: WC-17%Co y 75%Cr₃C₂-25%NiCr utilizando la técnica de HVOF, y FeCrSiB y Cr₂O₃-6SiO₂-4Al₂O₃ utilizando la técnica de rociado térmico por arco eléctrico. Por medio de esta investigación el autor logró concluir que el WC-17%Co demostró una mejor resistencia al desgaste erosivo que el acero AISI 1018 y que los otros tres recubrimientos utilizados.

Berger y colaboradores (1.996) estos investigadores utilizaron tres tipos de recubrimientos (WC-Co, Cr₃C₂-NiCr y TiC-Ni) empleando diferentes técnicas de rociado térmico tales como: APS, ARC, VPS, DGS, y HVOF. Realizaron una comparación entre estos a nivel de microestructura y propiedades. Determinaron que la técnica del HVOF para los recubrimientos de WC-CO, Cr₃C₂-NiCr y TiC-Ni tiene

mucha mejor resistencia a un ambiente abrasivo si se compara con las técnicas de APS y DGS, pero para desgastes erosivos la técnica de DGS otorga una mejor resistencia que la del HVOF.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1.- ROCIADO TÉRMICO

El proceso de rociado térmico se basa principalmente en la proyección de partículas de un material metálico o no metálico en una condición fundida o semi-fundida, atomizadas y aceleradas a muy alta velocidad sobre un sustrato, previamente preparado, para formar un recubrimiento.

Los materiales a rociar se pueden suministrar en forma de: polvo, varilla, cordón o alambre, para ser introducidos a una pistola, donde, con la ayuda de una fuente de calor que es producida por efecto de la ignición de un combustible o por un arco eléctrico, estos son calentados para pasar del estado sólido a un estado fundido y, por último, son acelerados por gas comprimido hacia el sustrato, previamente preparado. Las partículas impactan la superficie, se aplastan y forman una placa fina que se conforma y adhiere a las irregularidades de la misma. Estas placas poco a poco se van enfriando y consolidando, partícula por partícula y por medio de varias pasadas se consigue finalmente el revestimiento requerido. Véase la Figura N° 1.1 en la cual se muestra de forma esquemática la estructura de un recubrimiento.

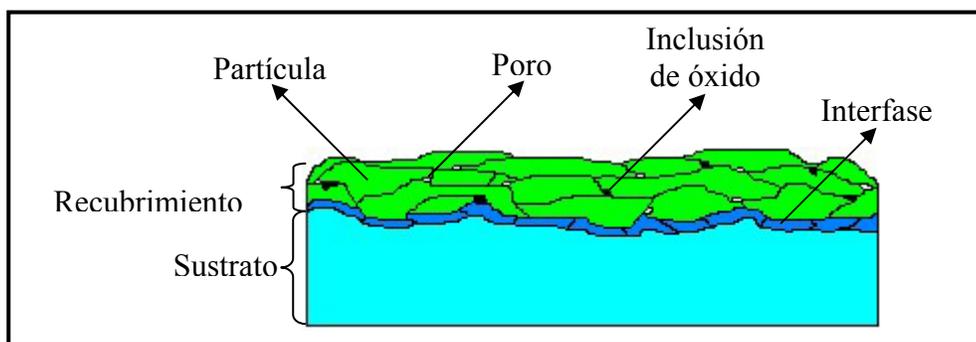


Figura N° 1.1. Estructura morfológica de un recubrimiento por rociado térmico.

Los recubrimientos por rociado térmico de metales, carburos, cerámicos o plásticos se utilizan frecuentemente en diferentes aplicaciones industriales de mantenimiento y producción. Estos pueden ser tan duros como el Carburo de Tungsteno o tan blandos como el Babbit (aleación estaño-cobre), siendo sus principales aplicaciones en superficies antifricción (cojinetes de cigüeñales), y en superficies antidesgaste (tornillos extrusores de plástico) respectivamente.

Un punto muy importante es que esta técnica permite aplicar revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie del sustrato. Por lo general esta temperatura se encuentra por debajo de los 200°C (392°F), eliminando los posibles cambios metalúrgicos y las posibles distorsiones en el material base (Bangueses y Rodríguez, 2000).

Para este tipo de recubrimiento la velocidad de proyección de las partículas fundidas juega un papel determinante.

Existen algunas características mecánicas y metalúrgicas que son muy importantes en un recubrimiento por rociado térmico de alta calidad. Dichas características son:

- ✓ Alta adherencia al sustrato.
- ✓ Alta cohesión entre las partículas.
- ✓ Baja microporosidad.
- ✓ Microestructura homogénea.
- ✓ Excelente acabado superficial.

Existen diversos métodos para la aplicación del rociado térmico, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos así como algunas ilustraciones que permiten visualizar los equipos empleados.

1.1.1.- Rociado térmico por arco eléctrico:

Este equipo genera una velocidad de proyección de la partícula, entre 183 y 335 m/s. El proceso es versátil y económico en función de los altos rendimientos que brinda.

El material de aporte utilizado en esta técnica es en forma de alambre. El calor es generado por el arco eléctrico creado entre los dos alambres cortocircuitados. Las partículas ya fundidas se proyectan y se aceleran sobre el sustrato por medio de aire a presión o mediante un gas inerte (Torelliz, 1994). La única limitante en este proceso es el material de deposición ya que debe ser maleable para poderlo convertir en un alambre conductivo continuo. Véase en la Figura N° 1.2 un ejemplo de un dispositivo para el rociado térmico por arco eléctrico con la especificación de sus partes.

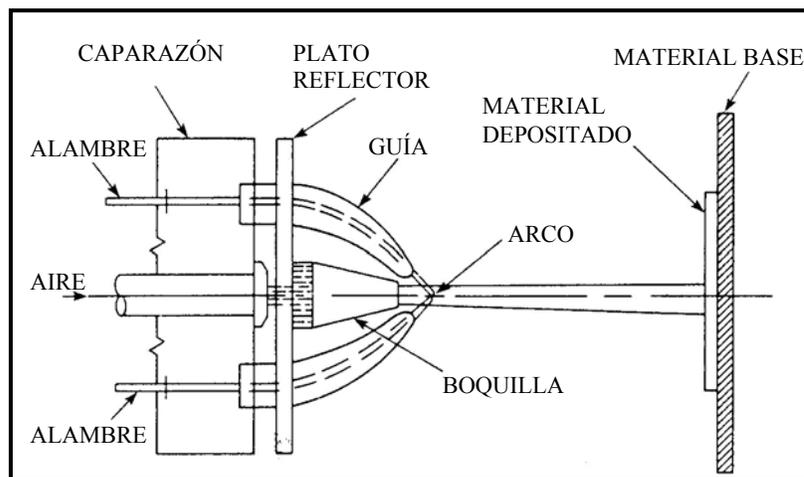


Figura N° 1.2. Dispositivo para rociado térmico por arco eléctrico. Tomado de Robert Tucker.

1.1.2.- Rociado térmico por medio de pistola de plasma:

Este tipo de proceso se caracteriza por tener una alta velocidad de proyección de la partícula, aproximadamente 760 m/s, también crea una buena adherencia al sustrato, pero tiene la gran desventaja de ser sumamente complejo. El rociado se logra mediante la aplicación de alta energía al gas seleccionado.

Esta unidad consta principalmente de una pistola a través de la cual se alimenta el gas. Este gas es sometido a la acción de un arco eléctrico de alrededor de 80 KW, convirtiéndolo en un plasma. Véase en la Figura N° 1.3 un dispositivo para el rociado térmico por plasma.

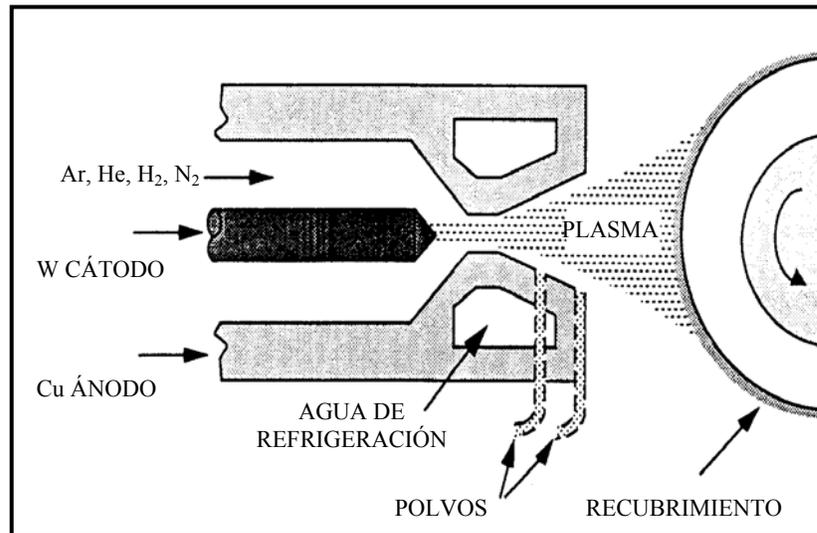


Figura N° 1.3. Dispositivo para termo rociado por plasma.
Tomado de Robert Tucker.

1.1.3.- Rociado térmico por llama:

En este proceso el material de alimentación es calentado en una cámara de combustión, en donde convergen un grupo de inyectores que proporcionan la mezcla del combustible con el oxígeno requerido para la combustión.

Existen varios tipos de rociado por llama, los cuales se pueden clasificar, según la velocidad que alcanza la partícula a depositar en el momento de ser proyectada hacia el sustrato, en:

- Llama subsónica:

En este la velocidad de la partícula es inferior a la del sonido (360m/s). Debido a esto existe poca energía cinética y los recubrimientos presentan una baja adhesión al sustrato en comparación con otros métodos, además presentan una gran porosidad.

- Llama supersónica:

La velocidad es mayor que la del sonido. Este tipo de proceso se identifica por tener ciertas características en el recubrimiento que aplica, tales como:

- ✓ Alta dureza y densidad.
- ✓ Bajo contenido de óxidos.
- ✓ Buena resistencia al desgaste.
- ✓ Buen acabado superficial.
- ✓ Recuperación de componentes desgastados.
- ✓ Incremento de propiedades eléctricas.

El proceso de rociado térmico por llama supersónica es conocido como HVOF. Este proceso se desarrolló a principios de los años '80 como técnica de proyección. Desde entonces, se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas, especialmente en el campo de la industria aeroespacial, papelera, automotriz y en la industria del acero como tal.

El equipo para HVOF consiste básicamente en una antorcha alimentada por una combinación de kerosene, oxígeno y nitrógeno, que debidamente dosificados entran en una cámara de combustión, en la cual sufren un proceso de ignición propiciado por la chispa de una bujía ubicada en la culata de la antorcha. Se genera entonces una llama en alta presión la cual experimenta libre expansión al atravesar una tobera convergente divergente, logrando una gran aceleración que le permite a la partícula alcanzar velocidades de hasta Mach 3 (Mach 1 es equivalente a 349 m/s @ aire a 30°C). En el cuello de la tobera se inyectan los polvos que formarán posteriormente el recubrimiento. Estos polvos alcanzan velocidades supersónicas al ser arrastrados por la llama, saliendo de la boca de la antorcha con una energía cinética tal que al impactar contra el sustrato sufren un aplastamiento que les permite quedar adheridas mecánicamente al mismo. Esta tecnología permite proyectar diferentes polvos metálicos, tales como: WC-Co, WC-CoCr, WC-Ni, Cr₃C₂-NiCr, TiC-NiCr, etc, proyectados sobre una gran variedad de sustratos. Estos recubrimientos tipo CERMETS son principalmente empleados en sistemas que deben estar sometidos a diferentes tipos de desgaste y/o en medios corrosivos.

A pesar de la baja temperatura de la llama de combustión los recubrimientos obtenidos por el proceso son de alta calidad y mucho mejores que los obtenidos por las otras técnicas. Véase la Figura N° 1.4, representación esquemática del proceso HVOF.

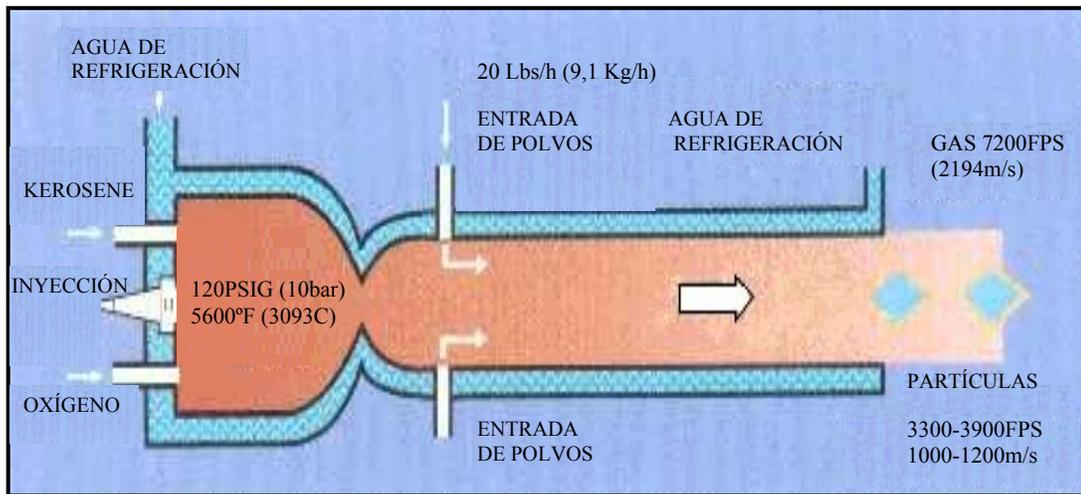


Figura N° 1.4. Dibujo esquemático de la pistola de HVOF. Tomado de los autores

1.2.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos son métodos que permiten modificar las propiedades mecánicas de los materiales, ya que pueden densificarlos, disminuir las microporosidades y redistribuir las fases presentes. Por lo tanto al aplicar tratamientos térmicos sobre materiales depositados por HVOF pueden obtenerse importantes cambios, ya que estos depósitos son sumamente porosos y con una distribución de fases característica debida al proceso de fabricación.

1.2.1.- Tipos de tratamientos térmicos:

Los tratamientos térmicos se pueden clasificar en dos grandes grupos: los eléctricos y los de llama. En los eléctricos el control del calor se puede efectuar de forma eficiente, así como también se pueden considerar parámetros como la temperatura de enfriamiento posterior y la atmósfera en la cual se lleva a cabo el procedimiento. Estos son empleados en situaciones en las que: la geometría de la pieza no permite el

libre acceso de una llama, las dimensiones son tales que el calor generado por la llama no es suficiente para permitir que el recubrimiento llegue al punto de fusión, el recubrimiento es muy delgado o las formas de la pieza son sumamente irregulares. Algunos de los inconvenientes que se presentan al momento de aplicar los tratamientos térmicos de tipo eléctrico son las limitaciones por el tamaño del equipo y la limpieza de la superficie a tratar.

A pesar de lo antes expuesto, el tratamiento térmico por inducido, el cual pertenece al grupo de los tratamientos térmicos eléctricos, representa una fuerte opción al momento de trabajar piezas muy largas, ya que se reducen los niveles de calor y de ruido, lo cual favorece el método desde el punto de vista de rendimiento del operador (García y Redden, 1.998).

El tratamiento térmico por llama por lo general se obtiene como producto de la aplicación del calor proveniente de una llama oxiacetilénica o de oxipropano. Según sea la geometría de la pieza, el tamaño y el sustrato será también el método de aplicación del tratamiento, por ejemplo, para piezas cilíndricas se emplea un sistema mediante el cual la pieza rota a baja velocidad mientras que la llama permanece estable. En cuanto a las características de la llama, se puede decir que a fin de evitar los efectos generados por los gradientes de concentración de los diversos componentes cuando éstos son sometidos a elevadas temperaturas, se emplea una llama reductora, una neutral o una llama oxidante según se considere necesario. Por ejemplo para aleaciones base Cobalto se emplean llamas reductoras y para aleaciones base Níquel se emplean llamas neutrales.

Con la finalidad de mantener una temperatura óptima, es necesaria la experiencia del operador del proceso, pero como elemento de ayuda para el reconocimiento de un proceso adecuado se puede considerar el aspecto físico del material, para ello basta con observar el color superficial y el brillo del recubrimiento. Con la ayuda de un pirómetro de radiación se puede medir la temperatura presente en la superficie de la pieza durante el procedimiento. En cuanto a la coloración del material se debe

observar una tonalidad rojiza y mate, con degradación uniforme a lo largo de la superficie.

En los casos en que la parte móvil sea la llama y no la pieza, se debe asegurar que el desplazamiento relativo entre ambas sea tal que permita una adecuada propagación del calor sin correr el riesgo de generar escoriaciones (García y Redden, 1.998).

1.3.- DESGASTE:

Existe un término que se debe de conocer antes de entrar en los tópicos del desgaste como tal, dicho término es la *Tribología*. Etimológicamente ésta palabra se halla compuesta por los vocablos griegos *tribo* que significa frotar o rozar y *logía* que significa ciencia. Entonces se puede definir a la tribología como la ciencia que estudia la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí, en presencia o ausencia de algún medio circundante. A ella se incorporan un gran número de tópicos tales como lubricación, fricción, desgaste y aspectos propios de los materiales.

La fricción se genera debido a la presencia de dos cuerpos en contacto, dichas fuerzas dependen de dos parámetros fundamentales como son: el área de contacto (que siempre será más pequeña que las superficies debido a las irregularidades microscópicas de todo material aún siendo visualmente liso) y las propiedades de los materiales en contacto.

La rugosidad otorgada a una superficie forma parte de un análisis especial en el cual se deben tomar en cuenta factores como: el maquinado, el tipo de ajuste, la lubricación, la carga y la temperatura de operación, entre otros agentes a los cuales se somete la pieza durante su utilización. Parámetros como el filo de la herramienta de corte, las vibraciones presentes en la máquina herramienta y las pequeñas variaciones en la velocidad de avance de la misma, pueden influir de forma notoria sobre el grado de rugosidad de una superficie. Se puede llegar entonces a decir que dos superficies nunca serán exactamente iguales por más empeño que se tenga durante su elaboración.

El desgaste representa una falla inevitable siempre que existan las condiciones que lo generan. Se considera que el desgaste no ocasiona fallas violentas, por lo tanto las fracturas repentinas no pueden ser consideradas como producto del desgaste, debido a que los materiales más resistentes al desgaste son frecuentemente frágiles y propensos a la fractura. El desgaste acarrea consecuencias tales como: la reducción en la eficiencia operativa, la pérdida de potencia por fricción, el incremento del consumo de lubricantes, el reemplazo o la reconstrucción de materiales desgastados y la pérdida de las maquinarias.

Uno de los factores limitantes en cuanto a la predicción del desgaste es que éste no constituye una propiedad característica de los materiales, sino que depende de todo el sistema con el cual el material interacciona.

El desgaste es considerado dentro de un sistema tribológico como todo material removido o indeseablemente desplazado de la superficie de un cuerpo, también es considerado desgaste el desplazamiento de material desde las zonas en contacto hacia las zonas libres de carga dentro del medio en el que trabaja.

No existe un solo tipo de desgaste, es por ello que para su estudio se divide el fenómeno en 5 grupos específicos que son:

1.3.1.- Desgaste Adhesivo:

Es llamado también desgaste por fricción o deslizante. Consiste en una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante y es generado por la adhesión entre las estructuras atómicas de los cuerpos en movimiento relativo. Las fuerzas de deslizamiento fracturan las uniones generando un intercambio de material entre ambas superficies, lo cual ocasiona nuevas cavidades en una de las superficies y proyecciones en la otra. Se puede llegar a pensar entonces que si dos superficies poseen un excelente acabado superficial tendrán una mayor área de contacto y por lo tanto una fuerza de adhesión superior. Otro aspecto a considerar es el relativo al efecto de la temperatura, el desgaste aumenta a medida que ésta se incrementa debido al aumento de la ductilidad de las asperezas. Sin embargo, se han

hallado temperaturas de transición, sobre las cuales las velocidades de desgaste disminuyen debido a la formación de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes. Su presencia típica se refleja en las chumaceras, los motores de combustión interna, los cojinetes de deslizamiento, los tornillos de potencia, las bielas, los engranajes, etc. El desgaste adhesivo es, por lo general, el primer mecanismo que actúa en los casos típicos de desgaste.

1.3.2.- Desgaste por Fatiga:

Se genera por la aplicación continua de cargas alternantes que crean tensiones sobre las capas superficiales ocasionando fisuras sobre las mismas. A medida que las fisuras se incrementan se origina un desprendimiento violento de material. Este fenómeno se presenta de forma común en las pistas de los rodamientos debido a las cargas cíclicas aplicadas.

1.3.3.- Desgaste Corrosivo:

Es el producto de la reacción del metal con el medio circundante, generando la formación de capas superficiales (películas) u óxidos. Estas películas generalmente son duras y actúan como agentes protectores del material hasta alcanzar valores críticos en los cuales se vuelven frágiles y son removidas para posteriormente hacer que el material repita su ciclo de formación. De esa forma el material pierde capas de forma progresiva y dichas capas a su vez se convierten en elementos causantes de desgaste abrasivo.

El desgaste corrosivo se puede observar en los cascos de los barcos, carrocerías de autos, y en general en superficies expuestas al medio ambiente.

1.3.4.- Desgaste Abrasivo:

Es el causado por las partículas duras que logran penetrar en una superficie ocasionando deformación plástica o arranque de virutas cuando ésta tiene un

movimiento relativo respecto a otra. Más información sobre este tema se desarrollará en el punto siguiente.

Adicional a lo anteriormente expuesto será considerado también desgaste abrasivo al que se produce cuando partículas duras se interponen entre dos superficies deslizantes ocasionando el desgaste o la deformación de ambas. El desgaste abrasivo ocasiona el deterioro de una superficie con acabado liso o pulido debido a la formación de marcas y ranuras, con esto la superficie antes lisa pasa a ser áspera y notablemente irregular. Este tipo de desgaste se puede presentar en estado seco o en presencia de líquidos. El desgaste abrasivo se subdivide a su vez en dos formas de desgaste que son: abrasión a baja presión, cuando el material es desgastado de forma gradual por la acción de las partículas generando un rayado o pulido (partículas de polvo, arena, cemento, etc.); y abrasión a alta presión, cuando el elemento abrasivo es forzado a penetrar entre las dos superficies, debido a las fuerzas aplicadas el abrasivo se fractura y genera nuevas pequeñas partículas con bordes agudos que acentúan el efecto de desgaste.

Para los aceros el contenido de carbono representa un factor condicionante ante el desgaste abrasivo, es por ello que la microestructura martensítica ofrece una mayor resistencia al desgaste abrasivo en comparación con la del tipo ferrita-carburo. Mediante refinamientos de perlita también se han hallado buenas condiciones de resistencia al desgaste abrasivo gracias a la elevada tasa de endurecimiento por deformación.

Para obtener un incremento considerable en cuanto a resistencia a la abrasión la dureza superficial debe hacerse mayor que la mitad de la dureza Vickers del abrasivo. Además, no es aconsejable, aumentar la dureza de la superficie a niveles superiores a 1,3 veces la dureza del abrasivo ya que el efecto puede resultar contraproducente. Para los aceros, a nivel general, los mejores valores de resistencia al desgaste se obtienen en matrices martensíticas, con carburos secundarios distribuidos de manera uniforme. Si la resistencia de los carburos se aumenta mediante el uso de aleaciones, la resistencia también aumenta, pero se debe tener presente la dureza de las partículas abrasivas. Véase la Fig N° 1.5 en la que se muestra una gráfica que

indica la influencia del contenido de carbono sobre la resistencia a la abrasión. Para aplicaciones en las que se requiera de una matriz tenaz, de forma tal que resista condiciones de impacto fuertes, lo recomendable es el empleo de una estructura austenítica inestable, dicha estructura va a tender a endurecerse por deformación, sufrir transformación de fase, o a ambos procesos durante el trabajo de abrasión (Babaresco y Klisans, 2.000).

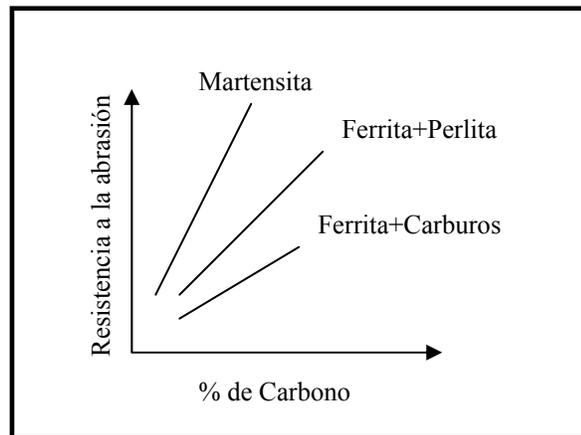


Figura N° 1.5. Influencia del contenido de carbono sobre la resistencia a la abrasión. Tomado de Bavaresco et al.

El material abrasivo puede ser de tamaños diversos así como de formas. Pueden presentarse materiales abrasivos de grano grueso o fino que a su vez presentan geometrías agudas o redondeadas según sea el tipo de material del cual provienen. Las teorías sobre desgaste abrasivo se fundamentan sobre ciertas restricciones referentes al material abrasivo y al tipo de desgaste, es decir, consideran al desgaste abrasivo como el rayado de la superficie causado por una partícula de forma cónica y aguda. Haciendo énfasis en el efecto de dicho cono al deslizarse sobre la superficie.

La *Ecuación de Archard* es una de las más comunes para el estudio del fenómeno abrasivo bajo las consideraciones mencionadas, a pesar de que fue elaborada inicialmente para estudiar el desgaste tipo adhesivo. Cuando un grano abrasivo efectúa remoción de material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse viene dado por:

$$W = A * d$$

donde: W es el volumen de material removido
 A es la sección transversal de la ranura
 d es la distancia de desplazamiento

A la vez, la sección transversal de la ranura (A), depende de la forma del grano abrasivo (representado por el factor k_1) y de la profundidad de la penetración (p), es decir, $A=k_1*p$. La profundidad de penetración es función de la carga aplicada (L), la dureza del material (H) y nuevamente de la forma del grano abrasivo (k_2), es decir, $p=k_2*L/H$. Dando por resultado, luego de simplificar algunos términos, que la Ecuación de Archard sea:

$$W = k_3 * (L * d / H)$$

donde: k_1 y k_2 se combinan en la constante k_3

Cabe señalar que existen muchos factores que afectan a k_1 , por ejemplo que estemos en presencia de corte o arado, el abrasivo puede deslizar y evitar el desgaste, por derrumbamiento puede no ser efectivo, durante el final de su trayectoria de contacto, etc.

Por lo general un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando este se refiere al recíproco del volumen desgastado, siendo este:

$$R = 1/W$$

La ecuación de Archard con pequeñas modificaciones es aún ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más completas.

Los factores que afectan las pérdidas por abrasión son:

- Abrasivo: los abrasivos son los elementos que debido a su elevada dureza y estructura cristalina producen un desgaste o corte, por acción mecánica sobre materiales menos duros que ellos. Los abrasivos pueden clasificarse en: *naturales* que son los que se hallan en la naturaleza (corindón, cuarzo, diamante, esmeril y óxido de

aluminio) y *artificiales* que son los producidos por reacciones químicas en procesos industriales.

- **Granulometría:** los abrasivos tanto naturales como artificiales son reducidos a polvo mediante máquinas trituradoras de las cuales salen con diversas dimensiones. Los abrasivos pueden clasificarse en función del tamaño de grano, para separarlos se emplean procesos de tamizado para los granos gruesos y sistemas de decantación para los más finos.
- **Forma:** es un factor de gran importancia cuando se habla de efectos de desgaste, ya que afecta la forma de la huella producida en el material, al igual que la carga de contacto y la transición entre el roce elástico y el plástico. A medida que el grano abrasivo sea más redondeado menor será el desgaste ocasionado.
- **Temperatura:** la rata de desgaste abrasivo aumenta en función de la temperatura, ya que la dureza y el esfuerzo de fluencia disminuyen. Sin embargo, cabe anotar que materiales como el Cu y el Al no modifican de forma notoria su resistencia al desgaste a partir de los 400 °C.
- **Velocidad de contacto:** el desgaste abrasivo aumenta cuando la velocidad se incrementa en el rango de 0 a 2,5 m/s. Este aumento se puede atribuir al calentamiento que ocurre en la superficie del material debido a la fricción.
- **Carga:** a partir de la ecuación de Archard se puede ver que el desgaste es proporcional a la carga, pero esto se cumple sólo hasta el punto en el cual la carga sea capaz de fracturar el material abrasivo. En función de la fractura del material abrasivo se pueden presentar dos situaciones: se pueden generar nuevos granos filosos que acentúan el desgaste o se pueden formar pequeñas partículas redondeadas que lo desfavorecen.
- **Humedad:** el efecto de la humedad aún no se ha aclarado de forma satisfactoria, ya que en dos procesos experimentales distintos otorgó resultados contradictorios.
- **Corrosión:** la abrasión, por lo general, se favorece con la corrosión, especialmente si el PH reinante es bajo. Cuando esto ocurre la abrasión crea

superficies “frescas” que rápidamente son corroídas, la capa corroída es removida por el efecto abrasivo y se forma así una nueva capa fresca para reanudar el ciclo, adicionando polvo corrosivo como material abrasivo luego de cada ciclo.

Todos los materiales sin excepción son presa fácil para el desgaste, más sin embargo, existen algunos con mayor resistencia que otros a dicho efecto. Algunos de los materiales que presentan cierta resistencia a la abrasión son:

- Los *cerámicos* ya que poseen una gran dureza relativa con respecto a la partícula abrasiva, teniendo como punto débil la baja resistencia ante cargas de impacto. Algunos de ellos son la Alúmina, el Zirconio y el Nitruro de Silicio.
- Los *metales* cuyas características de alta dureza, posible aleación con otros metales formadores de carburos y tamaño de grano superior al del agente abrasivo, les permiten estar ubicados entre los predilectos al momento de buscar materiales. Algunos de los más utilizados son las fundiciones blancas con alto porcentaje de carbono, el Cromo-Molibdeno, el Cromo-Níquel y las fundiciones blancas perlíticas. Su mayor inconveniente para la aplicación radica en la baja resistencia al impacto, escasa maquinabilidad y mala soldabilidad.
- Los *plásticos* poseen una resistencia al desgaste abrasivo que resulta directamente proporcional a la relación entre dureza y módulo elástico, es decir, a medida que la relación dureza-módulo elástico disminuye la resistencia también lo hace. Adicionalmente se ha obtenido, mediante procedimientos experimentales, que a medida que el peso molecular del plástico aumenta su resistencia al desgaste abrasivo aumenta también, tal es el caso de los llamados termoplásticos.

1.3.5.- Desgaste Erosivo:

Se puede decir que es un tipo de desgaste abrasivo el cual envuelve pérdida de material de una superficie en contacto con un fluido que contiene partículas. Para este proceso es indispensable el movimiento relativo entre la superficie y el fluido, en donde las fuerzas que causan el daño superficial son aplicadas por el fluido.

Existe una gran diferencia entre el desgaste erosivo y el desgaste abrasivo, la cual se refiere a que: en el erosivo, la fuerza ejercida por las partículas erosivas sobre el material es debida a su desaceleración, mientras que en el abrasivo la fuerza se aplica externamente y de forma constante.

Existen dos tipos de desgaste erosivo: la erosión abrasiva, en la cual el movimiento relativo es casi paralelo a la superficie erosionada y la erosión por choque, en la cual el movimiento relativo es casi normal a la superficie erosionada.

La erosión de una superficie metálica, se entiende como la masa o volumen perdido o removido de la superficie por unidad de masa de las partículas erosionantes, denominado factor de erosión. Es recomendable utilizar el volumen en vez de la masa, ya que el mismo nos permite evaluar la pérdida en materiales de diferentes densidades.

La correlación entre la resistencia a la erosión y el módulo de resistencia del material es (Redden, 1998):

$$R = \frac{S_y^2}{2 * E} \quad \text{donde: } R = \text{Módulo de Resistencia}$$

S_y = Resistencia a la fluencia

E = Módulo de Elasticidad de Young

Las partículas causantes del desgaste erosivo pueden variar en tamaños desde 5 a 500 μm y las velocidades de impacto están en un rango entre 5 y 500 m/s. A menudo las partículas erosivas varían en composición y son generalmente más duras que la superficie a desgastar. Entre los materiales utilizados para simular los procesos de erosión tenemos: el cuarzo, el óxido de aluminio y el carburo de silicio, los cuales tienen una dureza Vickers de 1300, 1750, 2000 Kg/mm^2 respectivamente.

Las variables que afectan la erosión se pueden dividir en tres tipos: las referidas a las características del impacto del fluido, las de la partícula y las del material.

Dentro de las variables básicas de impacto, tenemos: concentración de las partículas en el fluido, velocidad de la partícula (V) y el ángulo de incidencia (θ). Definimos al

ángulo de incidencia, como el ángulo que se forma entre la dirección del flujo de las partículas abrasivas y la superficie contra la cual son proyectadas.

Las variables referidas a las partículas son: el tamaño, la facilidad para la fractura, la forma y la dureza de la partícula (García 1998).

Finalmente, en cuanto a las variables del material, la tasa de erosión se ve afectada por el ángulo de impacto y la velocidad de la partícula erodante acorde con la siguiente relación:

$$E = K * V^n * f(\theta) \quad \text{donde: } E \text{ es el factor de erosión.}$$

K es la magnitud absoluta de la erosión.

V es la velocidad de la partícula.

N es el valor adimensional que para los metales se encuentra entre 2,3 y 2,5.

$f(\theta)$ es una función adimensional del ángulo de impacto, medido con respecto al plano del objetivo.

La variación de la erosión con respecto al ángulo de impacto depende críticamente de la naturaleza del material que está siendo erosionado, véase la Figura N° 1.6 en la cual se puede observar el comportamiento típico de un metal dúctil, como el aluminio, y de un material frágil, como la alúmina.

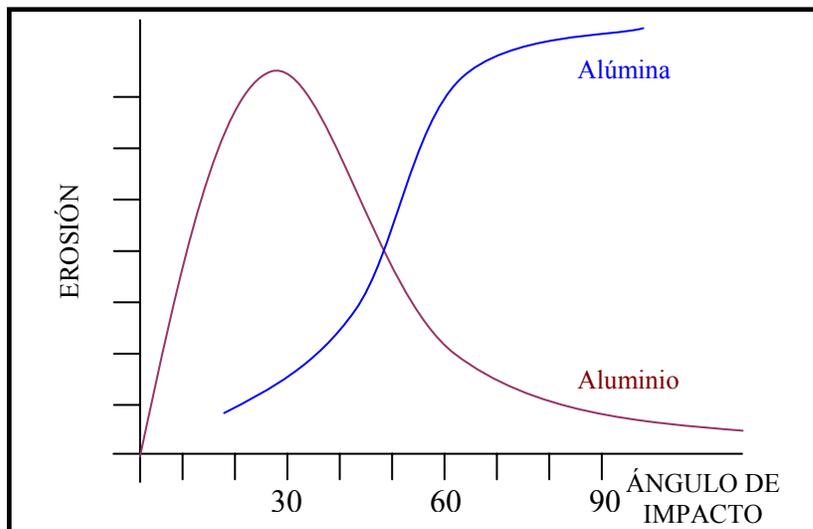


Figura N° 1.6. Variación de la erosión dependiendo del tipo de material. Tomado de Thomas Kosel et. al.

Para los valores de K, se tienen tablas de datos publicados para una gran variedad de materiales. Véase la Tabla 1.1 en la que se muestra una lista de valores de K en función de: el material, los erodantes, la velocidad de las partículas y su ángulo de incidencia.

Tener un conocimiento de las fuerzas y la deformación del material inducida por el impacto es esencial en cualquier teoría del mecanismo de la erosión. En algunas ocasiones puede ocurrir la deformación plástica del metal, esta deformación sólo existirá si el valor del esfuerzo de fluencia del material es excedido durante el impacto. Por lo tanto se conoce un valor adimensional denominado número de Best, el cual representa la magnitud del daño de la superficie (Malaver, 1995):

$$B = \frac{\rho * V^2}{Y} \quad \text{donde: B es el número de Best.}$$

ρ es la densidad del material.

V es la velocidad de impacto.

Y es el esfuerzo de fluencia del material.

Las deformaciones producidas por el impacto de las partículas erosionantes se pueden clasificar en función del Número de Best en 4 grandes grupos. Véase la Tabla 1.2 en la cual se relaciona el tipo de deformación a consecuencia del impacto con el Número de Best.

*Tabla 1.2. Variación del número de Best con el tipo de daño.
Tomado de Malaver et. al.*

Número de Best	Tipo de daño
10^{-5}	Cuasi-estático
10^{-3}	Inicio de deformación plástica
10	Deformación plástica extensiva
10^3	Fenómeno de hipervelocidad

Tabla 1.1 . Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados. Tomado de Malaver et. al.

MATERIAL	ABRASIVO	V(m/s)	ÁNGULO	K(10-8)	REFERENCIA
Al2024	Cuarzo	125	20°	0.83	Gat y Tabacoff, 1978
Al2024	Cuarzo	117	60°	0.38	Gat y Tabacoff, 1978
Al2024	Cuarzo	122	90°	0.41	Gat y Tabacoff, 1978
Al 6061-T6	SiC	90	30°	1.46	Sheldon, 1977
Al 6061-T6	SiC	91	20°	2.28	Tilly y Sage, 1970
Al-Puro	SiC	282	20°	0.31	Tilly y Sage, 1970
Al-Aleación	Cuarzo	244	90°	2.2	Tilly y Sage, 1970
Al-Puro	Al ₂ O ₃	129	20°	1.49	Neilson y Gilchrist, 1968
Al-Puro	Al ₂ O ₃	129	30°	1.3	Neilson y Gilchrist, 1968
Al-Puro	Al ₂ O ₃	129	90°	1.46	Neilson y Gilchrist, 1968
Al 1100-0	SiC	76	20°	1.46	Finnie, 1967
Al 1100-0	SiC	137	20°	1.32	Finnie, 1967
Al-4.75% Cu	SiC	30.5	30°	0.68	Brass, 1977
Cu	SiC	76	20°	2.54	Finnie, 1967
Cu	SiC	137	20°	2.55	Finnie, 1967
Cu	Cuarzo	82	20°	1.17	Tadolder, 1966
Ni	Cuarzo	82	20°	0.56	Tadolder, 1966
Ni	SiC	90	30°	1.82	Sheldon, 1977
Ti-Aleación	Cuarzo	128	90°	2.32	Tilly y Sage, 1970
Ti-Aleación	Cuarzo	244	90°	1.85	Tilly y Sage, 1970
Ti-Puro	Cuarzo	82	45°	0.69	Tadolder, 1966
Ti-Puro	Cuarzo	82	90°	1.11	Tadolder, 1966
Ti6A14V	Cuarzo	122	20°	0.83	Gat y Tabacoff, 1978
Ti6A14V	Cuarzo	116	60°	0.59	Gat y Tabacoff, 1978
Fe-Puro	Cuarzo	82	20°	0.59	Tadolder, 1966
Fe-Puro	SiC	76	20°	2.44	Finnie, 1967

Los valores de la velocidad de interés en los estudios de erosión recaen entre el rango elástico de baja velocidad y el de alta velocidad, el cual es mayor que 500 m/s, intervalo de interés en términos balísticos. El fenómeno de impacto en ambos regímenes (alta y baja velocidad), ha sido estudiado anteriormente (Goldsmith 1960, Backman y Goldsmith 1978); a lo contrario del daño a blancos metálicos semi-infinitos debido al impacto de proyectiles en el rango intermedio de velocidad, el cual ha sido relativamente poco estudiado. Un punto muy importante es la deformación y la fractura de las partículas abrasivas, la cual es ignorada, ya que se considera que se comportan como un cuerpo rígido, en donde las fuerzas de reacción sobre la partícula son debidas a la presión constante que actúa sobre el área de contacto entre el proyectil y el blanco de deformación plástica. Este acceso al mecanismo de indentación de un cuerpo rígido-plástico es sustentado por el trabajo con dureza de indentación de Tabor (1951). Véase en la Figura N° 1.7 el dibujo esquemático de la presión producto de la indentación por una esfera a incidencia normal.

Finnie (1958, 1972) y Finnie y Mcfadden (1978) examinaron el comportamiento de partículas angulares, asumiendo adicionalmente que la relación entre la fuerza normal y tangencial en la partícula, es una constante igual a dos, a través de este modelo se pueden obtener soluciones analíticas de las ecuaciones de movimiento y luego, derivar una expresión para el volumen de material desplazado por la partícula durante el impacto.

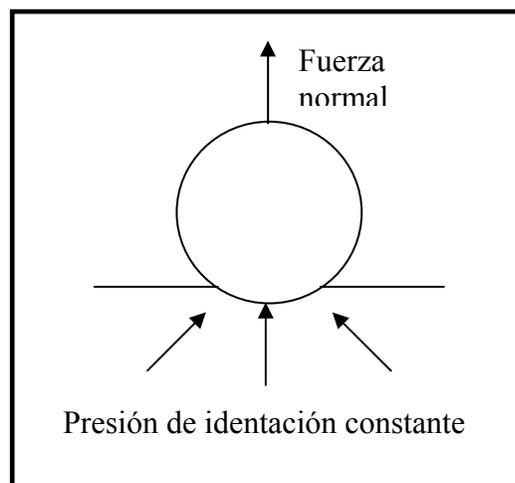


Figura N° 1.7. Modelo de Indentación rígido-plástico. Tomado de Ernest Rabinowics.

Existen teorías como las de Finnie y Mcfadden, que permiten la predicción del volumen del material desplazado de la superficie metálica por el impacto de una partícula simple para llegar a una predicción de la tasa de erosión.

Existen estudios experimentales, los cuales se realizaron con partículas angulares simples y con ángulos de incidencia oblicuos. Estos estudios indicaron, que el comportamiento de las partículas puede ser clasificado en tres tipos:

- Arado o “Ploughing”, en este el material deformado es desplazado hacia el borde final del cráter de impacto.
- Corte I, este presenta un corte en la superficie, levantando un gran fragmento de viruta al final del cráter, el cual es vulnerable a la remoción por el impacto de otra partícula.
- Corte II, en este último se rompe la partícula en sentido contrario a la trayectoria del impacto, provocando una remoción de material bajo la acción de un maquinado. Véase la Figura N° 1.8 en la cual se muestran los diferentes tipos de deformaciones que originan las partículas en el material.

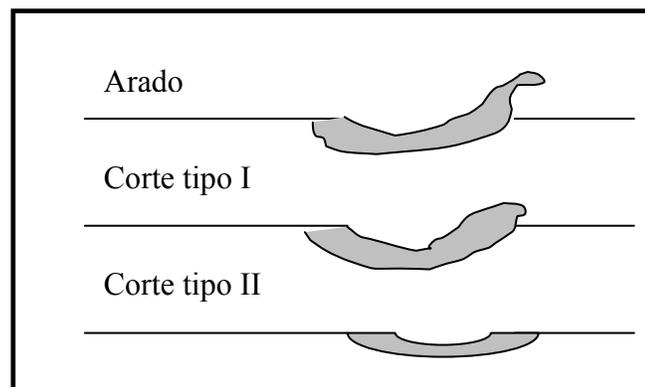


Figura N° 1.8. Tipos de deformaciones producidas por el impacto de las partículas. Tomado de Ferrara et al.

La fracción del volumen desplazado por un proyectil durante un impacto simple puede variar considerablemente con la forma, orientación, velocidad y ángulo de

impacto de la partícula abrasiva. Por ejemplo, para esferas que chocan sobre la superficie de un acero de bajo carbono a ángulos oblicuos, puede llegar a ser desplazado entre el 8 y 25% del material deformado, el cual se dirige a un borde al final del cráter de impacto; tomando en cuenta algunas condiciones de impacto, ángulo y velocidad, el borde podría desprenderse, generando una fuente de pérdida de peso (Hutchings 1976). Este caso de deformación ha sido llamado “ploughing”.

Estudios experimentales hechos con partículas angulares simples a ángulos oblicuos de incidencia indican, que el comportamiento de este tipo de proyectil bajo estas condiciones, puede ser clasificado en dos modelos, denominados corte tipo I y corte tipo II (Hutchings 1979).

Existe un problema al estimar la presión de indentación durante el impacto de las partículas, pero este se puede tratar empíricamente. Esto consiste en correlacionar las tasas de erosión medidas experimentalmente con las predicciones de la teoría de indentación rígido-plástico (Finnie, Levy y Mcfadden 1979). Se sabe que la pérdida de peso es dependiente de la fracción principal del volumen desplazado, en un principio removido por un impacto e inversamente proporcional a la presión de flujo del metal. Estas dos variables se tienen que trabajar juntas para hacer una medida independiente de la presión de flujo.

En cuanto a los dispositivos de la erosión, se debe tener claro que existe a ángulos oblicuos, cercanos al ángulo de máxima erosión y el desgaste erosivo por partículas a incidencia normal y cercana a la normal.

Al hablar de la erosión se debe resaltar que a ángulos oblicuos, modelos experimentales, con proyectiles esféricos simples y angulares, han logrado demostrar que el material puede ser removido en un simple impacto por mecanismos como el arado (ploughing) y el proceso de corte tipo II. Mientras que, para el proceso de corte tipo I en donde son desplazados grandes fragmentos estos son vulnerables a la remoción por impactos subsecuentes (Hutchings 1979). También se puede comentar que Sheldon y Kanhere (1972) estudiaron la remoción del metal a ángulos oblicuos de partículas esféricas simples.

De los dispositivos para la erosión a altos ángulos de choque o a incidencia normal se puede decir que Finnie (1979) dejó evidenciado que bajo estas condiciones una parte del volumen de indentación es removido de la superficie. Un impacto normal de una partícula esférica puede resultar de la formación de una indentación y en la extrusión de parte del material desplazado en un labio alrededor del filo del cráter; se tienen reportes de este tipo de comportamiento para muchos metales (Sheldon y Kanhere 1972, Hutchings 1974, Ives y Ruff 1978, Christman y Shewmon 1979).

Para el caso de la erosión, en donde la superficie es continuamente bombardeada, existen mecanismos para contabilizar la pérdida del material. La remoción de material por la fusión ha sido favorecida por algunos (Ascarelli 1970, Smeltzer 1970). La proporción de energía cinética de la partícula, la cual es transformada en calor por el trabajo plástico alrededor de la indentación, debe guiar a un gran aumento de la temperatura en esta región; pero aún no existe evidencia experimental que definitivamente indique que la causa de la remoción de material sea por un mecanismo de derretimiento. Se puede calcular el incremento de temperatura que se espera alrededor de la hendidura, asumiendo el calor que se generara en un volumen alrededor de la indentación. Algunos estudios microscópicos del desarrollo progresivo de la estructura de la superficie durante la erosión (Mayville 1977), han evidenciado que es muy difícil que la fusión sea un mecanismo de importancia en el caso de los metales, sin embargo existen evidencias que indican que esto podría ocurrir en materiales cerámicos (Yust y Crouse 1978).

El tiempo de duración del impacto de una partícula erosiva es corto. Se conocen dos modelos teóricos para poder estimar el tiempo de impacto normal de partículas esféricas en superficies planas, estos son:

- Primer modelo: en el cual las deformaciones de la partícula y el blanco se asumen como puramente elásticas.
- Segundo modelo: es el del comportamiento del blanco rígido-plástico.

Por ambos modelos los valores que se obtienen son muy similares al tiempo de contacto, el cual es directamente proporcional al tamaño de la partícula.

La rata de deformación varía con la raíz cuadrada de la velocidad de impacto y es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. (Malaver 1995).

1.4.- MATERIALES:

En cuanto a los materiales que se emplean para la elaboración de recubrimientos estos son muy diversos tanto en forma como en composición, es decir, el material de aporte puede ser en forma de polvo, varillas o alambre, además, se emplean diferentes elementos, puros o aleados, tales como: carbono, níquel, cromo, tungsteno, cobalto y vanadio, los cuales presentan propiedades características tales como: resistencia a la erosión, abrasión, corrosión, entre otras.

La variedad en cuanto al material de aporte está dada en función de los diversos métodos empleados para la elaboración de los recubrimientos, como ya se ha mencionado anteriormente, los procesos de HVOF y plasma emplean polvos como material de aporte, en cambio, el proceso de arco eléctrico emplea alambre.

Cuando se usan aleaciones éstas pueden venir premezcladas o, por el contrario, deben prepararse según los requerimientos exigidos. Una aleación premezclada puede ser el caso del Colmonoy 88[®] que es el nombre comercial de una mezcla específica de elementos formada por a%Cr, b%W, c%B, d%Si, e%Fe, f%C y g%Ni. Véase la Tabla 1.3 para conocer los valores de a, b, c, d, e, f y g. En otros casos las aleaciones deben prepararse según la necesidad. Cuando se trata de polvos, se dosifican los componentes que formarán la aleación y se someten a un proceso de mezclado por agitación, empleando para ello equipos especializados que garantizan, en función de ciertos parámetros, la homogeneidad de la mezcla.

Tabla 1.3. Composición química del Colmonoy 88. Tomado de los autores

% Cr	% W	% B	% Si	% Fe	% C	% Ni
15	17,3	3	4	3,5	0,8	56,4

Existen diversos grupos de materiales, los cuales, tal y como se ha verificado en otros trabajos realizados, tienen buena resistencia al desgaste. Estos materiales pueden ser colocados en la superficie de aquellos que tengan poca resistencia al desgaste, para ello se utilizan diversas técnicas, tales como: soldadura, rociado de plasma, rociado por llama, etc.

A continuación se describen brevemente tres de los grupos de materiales que comúnmente se utilizan para la elaboración de recubrimientos:

Cerámicos: algunos cerámicos presentan una sobresaliente resistencia al desgaste abrasivo, pero, a su vez, muestran una gran debilidad ante los impactos.

También los cerámicos al ser sometidos a altas cargas, están expuestos a microfisuras, las cuales causan grandes pérdidas de material. (Joseph H.).

Entre algunos de los materiales cerámicos tenemos: Alúmina, Zirconio y Nitruro de Silicio.

Metales: su principal uso es en ambientes abrasivos, ya que tienen muy buena resistencia para el desgaste abrasivo, esto se debe a la formación de carburos durante la solidificación (Joseph H.).

Este tipo de material presenta limitaciones en sus aplicaciones en la industria debido a su baja resistencia al impacto, si se compara con los aceros, y su maniabilidad en el momento del maquinado.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1.- DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El proceso de elaboración de este Trabajo de Investigación comienza con la búsqueda y revisión del material bibliográfico que encontramos a disposición, llámese: publicaciones periódicas, libros, trabajos de grado anteriores, páginas web. Posteriormente se realizaron, a grosso modo, los siguientes pasos:

- A.** Revisión de los equipos requeridos (HVOF, Abrasión, Erosión y Microscopía)
- B.** Fabricación de las probetas
- C.** Determinación de los parámetros del proceso de rociado térmico
- D.** Adquisición de los polvos de recubrimiento y preparación de los mismos
- E.** Adquisición de la arena para el ensayo abrasivo
- F.** Adquisición de la rueda de desgaste abrasivo
- G.** Adquisición de la arena para el ensayo erosivo
- H.** Preparación de la aleación para el recubrimiento WC-12%Co+80%Colmonoy88
- I.** Preparación de las probetas para la realización de los recubrimientos
- J.** Recubrimiento de las probetas
- K.** Aplicación del tratamiento térmico
- L.** Rectificación de la superficie de las probetas
- M.** Tamizado de la arena para el ensayo abrasivo
- N.** Tamizado de la arena para el ensayo erosivo
- O.** Limpieza y pesado de las probetas para abrasión antes de los ensayos
- P.** Limpieza y pesado de las probetas para erosión antes de los ensayos
- Q.** Aplicación del ensayo abrasivo
- R.** Aplicación del ensayo erosivo
- S.** Limpieza y pesado de las probetas después de los ensayos de desgaste abrasivo
- T.** Limpieza y pesado de las probetas después de los ensayos de desgaste erosivo*
- U.** Almacenamiento en el desecador de las probetas ensayadas por abrasión
- V.** Almacenamiento en el desecador de las probetas ensayadas por erosión
- W.** Corte de las probetas para microscopía electrónica y micro-dureza
- X.** Pulido de las probetas para microscopía electrónica y micro-dureza
- Y.** Embutido de las probetas para microscopía electrónica y micro-dureza
- Z.** Microscopía electrónica y micro-dureza
- AA.** Determinación de la densidad de los recubrimientos (3 métodos)
- BB.** Determinación de la densidad de los recubrimientos mediante microscopía
- CC.** Elaboración de los cálculos relativos al desgaste abrasivo
- DD.** Elaboración de los cálculos relativos al desgaste erosivo

EE. Generación de resultados

FF. Análisis y discusión de los resultados (ensayos y microscopía)

GG. Elaboración de las conclusiones y recomendaciones

Véase la Figura N° 2.1 en la cual se muestra un diagrama de flujo del procedimiento experimental empleando el método Pert-cpm.

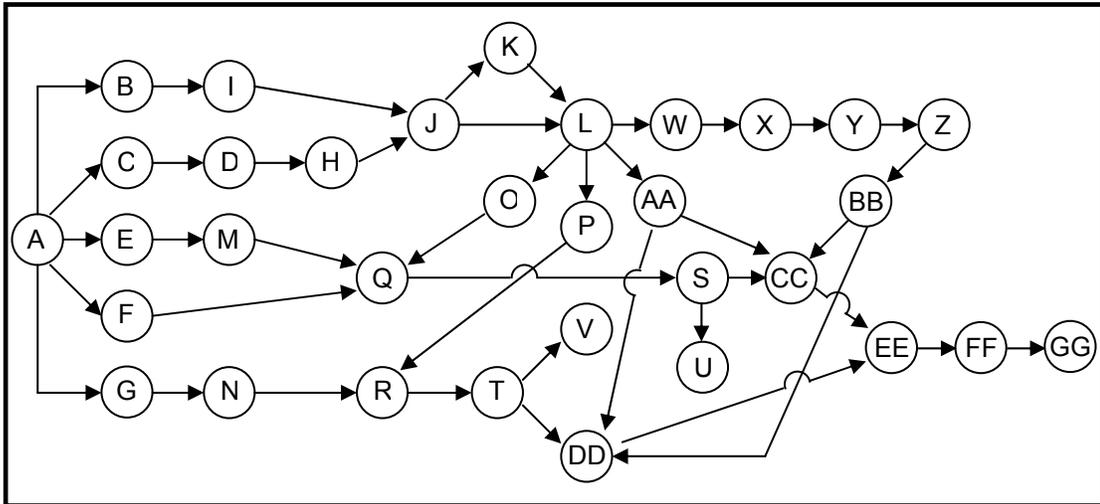


Figura N° 2.1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental. Tomado de los autores

2.2.- MATERIAL DE LAS PROBETAS

El material utilizado para el sustrato fue una pletina de acero AISI 1020, de la cual posteriormente mediante mecanizado se fabricaron las probetas en las medidas pertinentes. Véase la Figura N° 2.2 en la cual se presenta un dibujo esquemático de las probetas y sus correspondientes dimensiones. Las medidas de las probetas para el ensayo de abrasión fueron las indicadas según la Norma ASTM G65-C, y para el ensayo de erosión según la Norma ASTM G76-83. En total se requirieron 75 probetas, de las cuales 37 tienen las siguientes dimensiones (75x25x4.6 mm) y 38 tienen las siguientes dimensiones (30x10x3.2 mm). No todas ellas fueron recubiertas y ensayadas, algunas se emplearon para los ensayos del acero y las otras se emplearon para la microscopía electrónica.

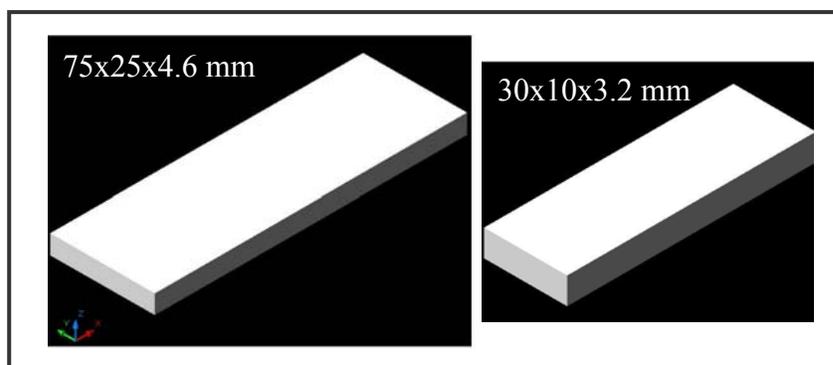


Figura N° 2.2. Medidas de las probetas a utilizar por ensayo.
Tomado de los autores

Véase la Tabla 2.1 en la cual se muestra la nomenclatura empleada para los diversos materiales de las probetas estudiadas. Véase la Tabla 2.2 en la cual se muestra la clasificación de las probetas en función de los ensayos, los materiales y las variables estudiadas en cada uno de los casos. Se puede observar que para los ensayos abrasivos se requirieron 36 probetas al igual que para los erosivos, pero el número de ensayos no es igual, ya que para el ensayo erosivo se aplicaron tres intervalos de tiempo sobre cada una de las probetas.

Tabla 2.1. Nomenclatura empleada para la identificación de los materiales estudiados. Tomado de los autores

Cuadro de nomenclaturas empleadas en este trabajo	
Material	Nomenclatura empleada
(WC-12%Co)+80%Colmonoy 88	Recu I
(WC-12%Co)+80%Colmonoy 88 con tratamiento térmico	Recu I TT
WC-10%Co+4%Cr	Recu II
Acero AISI 1020	Acero

Tabla 2.2. Número de probetas y de ensayos requeridos para el desarrollo de la investigación. Tomado de los autores

Materiales	Ensayos							
	Densidad	Abrasivo			Erosivo			$\theta_3 (t_1 t_2 t_3)$
		t_1	t_2	t_3	$\theta_1 (t_1 t_2 t_3)$	$\theta_2 (t_1 t_2 t_3)$		
Recu I	1	3	3	3	3	3	3	
Recu I TT	1	3	3	3	3	3	3	
Recu II	1	3	3	3	3	3	3	
Acero AISI 1020	0	3	3	3	3	3	3	
Total de probetas	3	36			36			
Total de ensayos	12	36			108			

2.3.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ROCIADO TÉRMICO

La etapa de preparación de la superficie de las probetas para la aplicación del recubrimiento se puede subdividir en tres procesos, los cuales son:

- Limpieza con Thinner comercial, el cual se emplea como desengrasante.
- Precalentamiento, mediante una llama oxiacetilénica las probetas son calentadas hasta aproximadamente 90 °C por un período de tiempo de 1 min. De esta forma se puede eliminar la humedad existente tanto en la superficie como en las porosidades del material.
- Granallado, en dirección perpendicular a la superficie del sustrato se rocía alúmina (Al_2O_3) con un tamaño de partícula de 800-2000 μm y una presión de aproximadamente 415 KPa. Esto permite obtener una superficie con una rugosidad que otorgue una buena adherencia del recubrimiento posterior. Se debe tener en cuenta que la unión sustrato-recubrimiento es netamente mecánica.

2.4.- PARÁMETROS DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

Para realizar los rociados térmicos se empleó: una mezcla con (WC-12%Co)+80%Colmonoy88 y una aleación de (WC-10%Co)+4%Cr. El proceso de HVOF se llevó a cabo mediante una pistola modelo JP 5000.

Véanse las Tablas 2.3 y 2.4 en las cuales se muestra de forma detallada los diferentes parámetros que se deben ajustar en el equipo de rociado térmico antes de realizar cada uno de los recubrimientos.

Véase en la Figura 2.3 la aplicación del rociado térmico sobre un grupo de probetas para ensayo erosivo y abrasivo, y también la manera como son fijadas las probetas para facilitar su manejo durante el proceso.

Tabla 2.3. Parámetros para recubrimiento (WC-12%Co)+80%Colm 88. Tomado de los autores

Temperatura de precalentamiento del sustrato	82°C
Distancia de rociado térmico	406.4 mm
Presión de Oxígeno	1616 KPa
Flujo de Oxígeno	300 L/min
Presión de Kerosén	862 KPa
Flujo de Kerosén	0.35 L/min
Presión de la cámara de combustión	759 KPa
Velocidad de alimentación de los polvos (tornillo)	383 r.p.m

Tabla 2.4. Parámetros para recubrimiento (WC-10%Co)+4%Cr. Tomado de los autores

Temperatura de precalentamiento del sustrato	82°C
Distancia de rociado térmico	406.4 mm
Presión de Oxígeno	1517 KPa
Flujo de Oxígeno	700 L/min
Presión de Kerosén	862 KPa
Flujo de Kerosén	0.35 L/min
Presión de la cámara de combustión	759 KPa
Velocidad de alimentación de los polvos (tornillo)	380 r.p.m

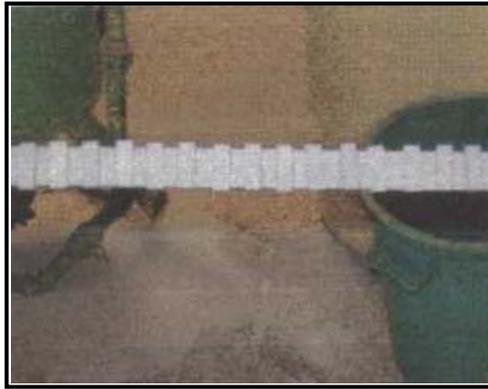


Figura 2.3. Aplicación de rociado térmico. Tomado de los autores.

2.5.- TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR

Para la aplicación del tratamiento térmico se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Las probetas se fijaron por medio de puntos de soldadura a un perfil angular de metal para facilitar el manejo. Véase la Figura N° 2.4.



*Figura N° 2.4 . Fijación de probetas.
Tomado de los autores.*

- Luego el perfil con las probetas se fijó en posición horizontal en las mordazas de un torno, esto se hace para facilitar la movilidad de la pieza durante la aplicación del tratamiento.
- Se encendió la pistola de llama oxiacetilénica y se ajustó la llama de modo de obtener el calor necesario para el proceso.
- Se realizaron varias pasadas rápidas con la llama a grupos de 5 ó 6 probetas a la vez, a fin de obtener un precalentamiento, para luego dejar la llama fija sobre cada una de ellas durante aproximadamente 1 minuto. Véase la Figura N° 2.5 en ella se observan las probetas durante la aplicación del tratamiento térmico. En ese momento la temperatura de las probetas era de aproximadamente 800-900°C.

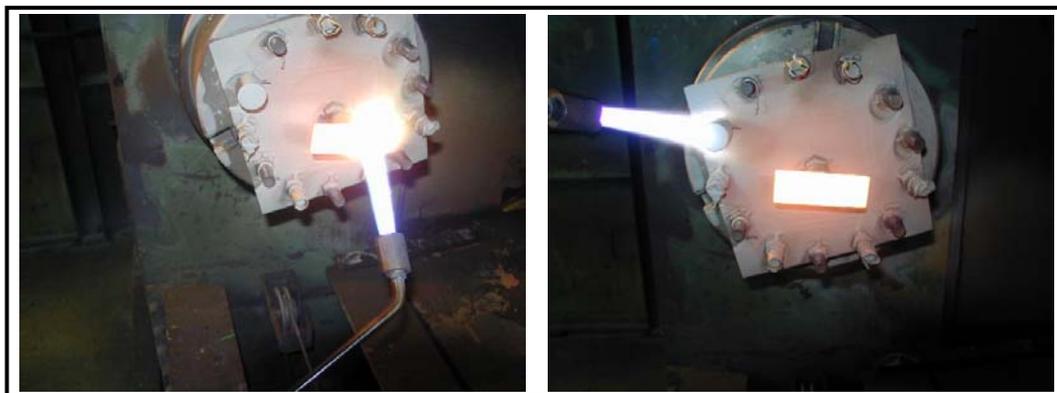


Figura N° 2.5 . Aplicación del tratamiento térmico. Tomado de los autores

- Al verificar que la temperatura de las probetas es la apropiada, se apaga la llama y se dejan enfriar las probetas hasta que alcancen la temperatura ambiental. El enfriamiento es lento.
- Cuando las probetas se enfriaron (27 a 30 °C) se procedió a separarlas del perfil metálico por medio de un esmeril. Deben evitarse los impactos fuertes sobre las probetas recubiertas, ya que pueden generarse grietas en el recubrimiento o el desprendimiento del mismo.

2.6.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS PROBETAS PREVIO A LOS ENSAYOS

Para la preparación de las probetas recubiertas, se procedió de la siguiente forma:

- Se rectificaron las probetas mediante un centro de mecanizado. Véase la Figura N° 2.6 en la cual se ilustra el centro de mecanizado de la EIM. Este es marca Mitsubishi CNC, modelo Dynamyte 4400m. La herramienta empleada para el corte tiene una banda de abrasivo de diamante, de forma de poder realizar un desbaste limpio de la superficie.

Se debe garantizar que el plano del recubrimiento sea paralelo al del sustrato.

- Se limpiaron las probetas para eliminar los residuos y la humedad superficial.
- Se pesó cada una de las probetas mediante el empleo de una balanza analítica, marca Scientech SA310 con una precisión de 0,0001g. Véase la Figura N° 2.7.
- Se guardaron las probetas en un desecador, marca Metaserv, para protegerlas tanto de las impurezas del ambiente como de la humedad. Véase la Figura N° 2.8.



*Figura N° 2.6. Centro de Mecanizado de la E.I.M.U.C.V.
Tomado de los autores*



*Figura N° 2.7. Balanza Analítica.
Tomado de los autores*



*Figura N° 2.8. Desecador.
Tomado de los autores*

2.7.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, MICRODUREZA Y RUGOSIDAD

Para llevar a cabo estos procesos se tomó una muestra de cada recubrimiento. A estas muestras se les realizó una preparación previa, tal y como se explica a continuación:

2.7.1.- Preparación de las muestras:

- Se les realizó un corte transversal a cada una de las muestras, para poder obtener una vista del recubrimiento junto al sustrato en un plano único. Este corte se lleva a cabo mediante el uso de una cortadora de disco abrasivo, la cual no induce deformaciones y asegura un corte limpio y sin desprendimiento del recubrimiento. Véase la Figura N° 2.9 la cual muestra el equipo de corte empleado.



*Figura N° 2.9. Cortadora de precisión.
Tomado de los autores*

- Posteriormente se procedió a realizar el embutido en frío de las muestras. El proceso se lleva a cabo en frío ya que el proceso de embutido en caliente requiere de la aplicación de presiones y temperaturas que podrían afectar los resultados. Para el embutido se preparó la resina epóxica, se vació en los moldes que contenían los trozos de las probetas y se dejó secar durante 24 horas. Véase la Figura N° 2.10 en la cual se muestran las probetas embutidas y pulidas.



Figura N° 2.10. Probetas embutidas y pulidas. Tomado de los autores

- Se pulió la superficie de las muestras embutidas mediante un equipo de desbaste que permite obtener una condición especular. El equipo consta de un plato rotatorio que emplea como elementos de desgaste papeles de carburo de silicio de diversas granulometrías (240-1200) y para la obtención del acabado tipo espejo fieltros humedecidos con solución de alúmina y suspensión de diamante. Véase la Figura N° 2.11. Equipo de desbaste y pulitura.



Figura N° 2.11. Equipo de desbaste y pulitura. Tomado de los autores.

2.7.2.- Descripción de los equipos:

- La MEB se llevó a cabo mediante un equipo marca Philips, modelo XL 30, el cual permite realizar ampliaciones de hasta 5000x tanto de contrastes composicionales (mediante el uso de electrones primarios) como de la topografía de la superficie (mediante el uso de electrones secundarios). El equipo también brinda la posibilidad de realizar la Espectroscopia por Dispersión en Energía de Rayos X

(EDS), la cual otorga los porcentajes atómicos y en peso de algunos de los elementos (Ej.: Ni, Co, Si, W, Cr) que se encuentren inmersos dentro de la superficie en estudio. Véase la Figura N° 2.12 en la cual se muestra el equipo de microscopía electrónica que fue utilizado para el estudio de las muestras.



*Figura N° 2.12. Microscopio Electrónico de Barrido.
Tomado de los autores*

- Para el estudio de la dureza se empleó un micro-durómetro marca Leco, modelo M-400-H, equipado con un indentador Vickers. Adicionalmente se contó con un analizador digital de imágenes y el software necesario para la automatización del proceso de indentación y la medición precisa de las huellas dejadas por el indentador sobre la superficie después de los ensayos. Se garantizó así el distanciamiento suficiente entre las distintas indentaciones, como para no realizar mediciones sobre las zonas endurecidas por la deformación en torno a cada una de las huellas. La carga aplicada fue de 300 HV y el recorrido seguido para los ensayos consistió en 3 bandas verticales (recubrimiento-sustrato) con 12 indentaciones cada una, separadas entre sí 100 μm en dirección vertical y 200 μm en dirección horizontal entre cada una de las 3 bandas. Además, se realizaron 8 mediciones aleatorias sobre el recubrimiento, las cuales aunque no fueron promediadas con los valores del barrido, se compararon con dichos resultados a fin de estudiar la uniformidad en cuanto a la dureza de la

superficie. Véase la Figura N° 2.13 en la cual se muestra el equipo de microscopía electrónica que fue utilizado para el estudio de las muestras.



*Figura N° 2.13. Microdurómetro.
Tomado de los autores.*

- En la determinación de la rugosidad se empleó un Rugosímetro de contacto marca Mitutoyo modelo SJ 201, el cual reporta un valor denominado Ra (desviación promedio aritmética del perfil, la cual consiste en el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias desde la línea media al perfil). Véase la Figura N° 2.14. Rugosímetro.



*Figura N° 2.14.
Rugosímetro. Tomado de
los autores*

2.8.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Para llevar a cabo el cálculo de la densidad se emplearon 4 procedimientos que listaremos a continuación. Con los valores obtenidos se realizó un estudio comparativo para poder determinar el procedimiento que se iba a utilizar a lo largo de los cálculos referentes tanto al ensayo abrasivo como al erosivo.

2.8.1.- Método de las dimensiones:

Este método se basó en tomar las dimensiones junto con los pesos iniciales de los sustratos y las dimensiones junto con los pesos de los sustratos una vez recubiertos y rectificadas. Para hallar los pesos se empleó una balanza analítica Scientech SA310 (Véase la Figura N° 2.7) y para hallar las dimensiones se empleó un Vernier marca Mauser con una precisión de 0,02 mm. Con las dimensiones se procedió a calcular el volumen del sustrato y el volumen de la probeta recubierta. Luego se restó al peso de la probeta recubierta el peso del sustrato y al volumen de la probeta recubierta el volumen del sustrato, para así obtener el peso y el volumen del recubrimiento exclusivamente y poder aplicar la ecuación para el cálculo de la densidad del recubrimiento:

$$\rho = \frac{V[\text{mm}^3]}{m[\text{g}]}$$

donde: ρ es la densidad del recubrimiento
 V es el volumen
 m es la masa

2.8.2.- Método de la inmersión:

Este método consistió, tal y como en el caso anterior, en pesar y hallar el volumen tanto del sustrato como de la probeta recubierta y rectificadas. La diferencia existente es que los volúmenes se hallaron mediante la inmersión, tanto del sustrato como de la probeta recubierta, en un cilindro graduado con una precisión de 0,5 ml, para hallar así de forma directa los volúmenes sin requerir del uso de las dimensiones. Este método nos permite evitar las imprecisiones referentes a la toma de las dimensiones,

pero presenta una imprecisión por la lectura del menisco formado por el líquido en el cilindro graduado.

2.8.3.- Método de la inmersión del recubrimiento:

Para llevar a cabo este procedimiento se le aplicaron cargas de compresión en diferentes direcciones a la probeta recubierta, mediante el uso de una prensa hidráulica manual, con el fin de lograr el desprendimiento del recubrimiento con respecto a la superficie del sustrato. Los trozos desprendidos del recubrimiento se pesaron empleando la misma balanza que en los casos anteriores y posteriormente se sumergieron en un cilindro graduado con una precisión de 0,2 ml, para así poder aplicar de forma directa la ecuación del cálculo de la densidad. Este método presenta como imprecisión la lectura del volumen mediante el menisco del cilindro graduado, pero en este caso, ya que las dimensiones de los trozos a sumergir son pequeñas, se pudo emplear un cilindro de menor capacidad y mayor precisión.

2.8.4.- Método de la Microscopía Electrónica:

Para llevar a cabo este método se determinó, mediante el uso de un Vernier, el área del recubrimiento, es decir, su largo y profundidad. También se determinó la masa del recubrimiento haciendo para ello la diferencia de pesos antes y después de recubrir. Finalmente, haciendo uso de la MEB, se procedió a determinar el espesor de la capa de recubrimiento para poder calcular así el volumen del mismo. La microscopía electrónica de barrido permite hallar el espesor del recubrimiento de una forma bastante precisa, ya que se puede observar la banda de recubrimiento ampliada y así establecer un promedio entre las crestas y los valles de la unión recubrimiento-material base. Con estos datos se aplicó la fórmula para el cálculo de la densidad. Este método brinda una gran precisión en cuanto al cálculo del espesor del recubrimiento, pero trae consigo los errores que implica la determinación del área del recubrimiento, ya que los bordes del mismo no son perfectamente angulados a 90°.

2.9.- ENSAYO DE EROSIÓN

El ensayo fue realizado bajo las indicaciones presentes en la Norma ASTM G76-83; es decir, que todas las variables que se manejan en el ensayo están normalizadas. Todas estas probetas fueron limpiadas cuidadosamente en su superficie, y llevadas a una rugosidad superficial de aproximadamente 1 μm .

Para la verificación de las condiciones de la alúmina (arena erosiva), la cantidad de humedad retenida y la granulometría se procedió de la siguiente forma:

- La cantidad de humedad contenida en la alúmina no debe superar el 0,5% en peso. Para verificar tal condición se tomaron 100 g de arena y se colocaron en un horno a 120 °C durante 1 hora, luego se pesó nuevamente y se comprobó que la pérdida de peso de los 100 g iniciales no superaba los 0,5 g luego del proceso de secado.

- La granulometría debe ser tal que sus granos posean unas dimensiones que oscilen entre los 50 y los 70 μm , para la comprobación de este parámetro se procedió a tamizar 1000 g de la arena, durante 15 min, empleando mallas de diversas aperturas mediante una máquina tamizadora. Véase la Figura N° 2.15. Tamizadora de precisión.

Se tamizaron tres porciones de alúmina de 1000 g cada una durante un tiempo de 15 minutos y se pudo comprobar que la calidad de la arena en función de la granulometría era aceptable. Véase la Tabla 2.5 en la cual se muestran los resultados obtenidos a partir del proceso de tamizado de la alúmina.

Las probetas se ensayaron en intervalos de tiempo de 3 min. Algunas de ellas fueron sometidas a desgaste una vez, es decir, 3 minutos solamente; otras dos veces, es decir, 6 minutos y otras tres veces, es decir, 9 minutos. Este procedimiento se aplicó a tres ángulos de ataque distintos, se empleó un ángulo de 30°, luego uno de 60° y finalmente uno de 90°. Cabe anotar que al cambiar el ángulo se emplearon probetas nuevas para los ensayos, es decir, el desgaste se realizó de forma acumulativa para los tiempos más no para los ángulos.



Figura N° 2.15. Tamizadora de precisión. Tomado de los autores

Tabla 2.5. Medición de la granulometría de la alúmina. Tomado de los autores

Según las pruebas realizadas					
# Tamiz	Cantidad pesada (g)	Retenido #1 (g)	Retenido #2 (g)	Retenido Promedio	% Retenido en cada malla
200	1000	330	374	352	35,2
270	1000	387	398	393	39,3
325	1000	156	102	129	12,9

Para la verificación del flujo de abrasivo se procedió a medir el consumo de alúmina durante un periodo de 3 minutos, chequeando a la vez que la presión de salida del aire en el compresor fuese de 0,34 MPa. Los pasos seguidos para la revisión de tales condiciones fueron:

- Se pesaron 1000 g de alúmina y se vaciaron en la tolva de la máquina de ensayo. Se abrió la salida del flujo de abrasivo durante un tiempo de tres minutos y luego se procedió a pesar la arena que quedó en la tolva. El valor obtenido se le restó al peso inicial de 1000 g, para así obtener el consumo de arena en un lapso de tres

minutos. Este procedimiento se realizó tres veces de forma consecutiva y los resultados obtenidos permitieron aseverar que el flujo de erosivo era correcto.

- La presión del compresor se midió con un manómetro para corroborar que la presión de salida del aire fuese la exigida por la Norma.

Descripción de la máquina de erosión:

El equipo utilizado para este ensayo fue una máquina neumática de gas a chorro, el cual fue fabricado por Luis La Barbera e Ignio Malaver en 1995 como Trabajo de Grado. Ellos se rigieron por la normativa de los ensayos de erosión. Este equipo permite controlar la velocidad, la dirección y la cantidad de abrasivo a impactar, así como la distancia entre la pistola y el material a ensayar. Véase la Figura N° 2.16. Equipo de ensayo erosivo en la cual se especifican cada una de las partes principales de la máquina.

Una vez que las probetas se encuentran en las condiciones adecuadas (limpias, secas y rectificadas) para la realización de los ensayos, y tanto el equipo como la arena cumplen con los parámetros normalizados, se procede a aplicar el método de desgaste especificado en la norma ASTM G76-83, para ello:

- Se vació el material abrasivo, alúmina, en la tolva de la máquina de ensayo.
- Se verificó la distancia entre el porta probetas y la salida del abrasivo (9cms)
- Se colocó la probeta en el porta probetas y se ajustó al ángulo requerido.
- Se prendió el compresor y se esperó a que éste obtuviera la presión requerida.
- Se abrió el flujo de abrasivo durante un lapso de 3 minutos.
- Se retiró la probeta del porta probetas, se limpió y se secó.
- Se pesó la muestra.
- Los pasos anteriores se repitieron una vez más para los ensayos de 6 minutos y dos veces para los de 9 minutos, manteniendo siempre la misma probeta.

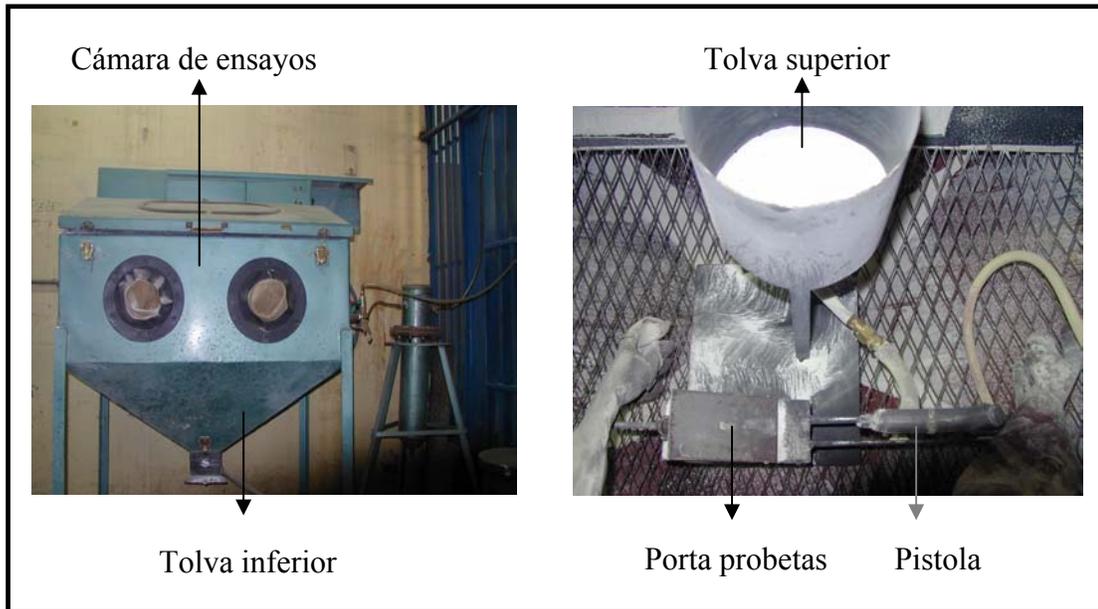


Figura N° 2.16. Equipo de ensayo erosivo y sus partes. Tomado de los autores

A través de estudios anteriormente realizados, se comprobó que el diámetro interno de la boquilla de la pistola no sufre desgaste considerable, por lo tanto se garantiza la uniformidad de los ensayos en cuanto a la velocidad de la partícula.

2.9.1.- Cálculos realizados para el ensayo de erosión:

Los resultados que se obtuvieron a través del ensayo, se reportaron como pérdida de volumen para cada una de los materiales erosionados por gramo de erodante, en cada ángulo. Para poder hallar la masa de las muestras antes y después del ensayo se utilizó una balanza electrónica Scientech SA310, con precisión de 0.0001 g. Véase la Figura N° 2.7.

Para iniciar los cálculos se halló la Tasa de Erosión (RE), valor que permitirá observar la pérdida de volumen por Kg de erodante. Para ello se empleó la siguiente ecuación:

$$RE = \frac{\Delta P}{\rho * ma} \quad \text{donde: RE es la tasa de erosión en mm}^3/\text{gr}$$

Δm es la (masa antes ensayar) – (masa después ensayar) en gr

ρ es la densidad del recubrimiento en gr/mm³

ma es la masa del abrasivo en gr

Luego se calculó el Factor de Erosión Normalizado (FEN), en donde se puede comparar la pérdida de volumen del recubrimiento con respecto al material base, a través de la siguiente ecuación:

$$FEN = \frac{(RE_{\text{recubrimiento}})}{(RE_{\text{control}})} \quad \text{donde: FEN es el factor de erosión normalizado}$$

RE_{control} es la tasa de erosión del material de referencia en mm³/gr (Acero 1020 en nuestro caso)

RE_{recubrimiento} es la tasa de erosión del recubrimiento en mm³/gr

Este factor nos facilitará la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo, con los de otros investigadores anteriores.

2.10.- ENSAYO DE ABRASIÓN

Según las Normas de la ASTM (American Standard Testing Methods) las probetas que se emplean para este tipo de ensayos deben poseer una rugosidad superficial de 0.8 μm, una superficie plana y deben estar completamente libres de impurezas, para garantizar así que los ensayos realizados otorguen resultados confiables. Cualquier defecto superficial o impureza puede desencadenar un error en los resultados obtenidos. De igual forma, la arena de cuarzo redondeado, empleada como agente abrasivo, debe cumplir con parámetros específicos en cuanto a humedad, tamaño de grano y dureza.

Para la verificación de las condiciones del abrasivo, según la American Foundry Sand en su norma AFS 50-70, en cuanto a la rueda de desgaste, la cantidad de humedad retenida y la granulometría de la arena de cuarzo se procedió de la siguiente forma:

- La cantidad de humedad contenida en la arena de abrasión no debe superar el 0,5% en peso. Para verificar tal condición se tomaron 100g de arena y se colocaron en un horno a 120°C durante 1 hora, finalmente se pesó nuevamente y se comprobó que la pérdida de peso de los 100g iniciales no superaba los 0,5g luego del proceso de secado.
- La granulometría de la arena debe ser tal que el tamaño de grano debe estar entre los 212 y los 300 μ m. Para comprobar tal condición se procedió a tamizar la arena empleando mallas de diversas aperturas, véase la Tabla 2.6, mediante el uso de una máquina tamizadora. Véase la Figura N° 2.17, tamizadora industrial.

Luego de realizar los procesos de tamizado correspondientes se obtuvieron resultados con una buena aproximación con respecto a los requerimientos exigidos por la Norma. Véase la Tabla 2.7 en la cual se indican los resultados obtenidos en cuanto al tamizado.

*Tabla 2.6 Granulometría de la arena según Norma.
Tomado de ASTM G65-C*

Según la Norma		
Tamiz #	Tamaño poro (μ m)	% Retenido
40	425	0
50	300	5 máximo
70	212	95 mínimo
100	150	0



Figura N° 2.17. Tamizadora industrial. Tomado de los autores.

Tabla 2.7. Resultados del tamizado. Granulometría de la arena. Tomado de los autores

Según las pruebas realizadas						
# Tamiz	Cantidad pesada (g)	Retenido ensayo #1 (g)	Retenido ensayo #2 (g)	Retenido ensayo #3 (g)	Promedio (g)	% Retenido en cada malla
60	1000	650	705	685	680	68
80	1000	225	217	221	220,9	22,09
Base	1000	125	78	94	99,1	9,91

- La rueda de desgaste es un disco compuesto por un núcleo metálico y una banda exterior de goma. La fabricación de dicha goma requiere una composición específica para garantizar la uniformidad en cuanto a sus características (resistencia, ductilidad, porosidad). Véase la Tabla 2.8. Composición química de la banda de desgaste abrasivo.

Tabla 2.8. Composición química de la banda de desgaste abrasivo. Tomado de ASTM G65-C

Fórmula para goma de clorobutil		
#	Material	% en peso
1	Chlorobutyl N° HT 10-66	100
2	Agerite Staylite-S	1
3	HAF black	60
4	Circoloight oil	5
5	Stearic acid	1
6	Zinc oxide	5
7	Ledate	2

Previo a la realización de los ensayos se procedió a verificar el flujo de arena a través de la boquilla del equipo, el funcionamiento correcto del temporizador y la carga aplicada por las probetas sobre la rueda de desgaste. Los pasos seguidos para la verificación de tales condiciones fueron:

- Se realizaron tres (3) pesadas de arena de 350g cada una y se procedió a verter de forma separada cada una de ellas en la tolva de la máquina de ensayo. Se tomó el tiempo requerido por el equipo para vaciar, a través de la boquilla, la totalidad de la arena en cada uno de los casos. Véase la Tabla 2.9. Resultados obtenidos para la verificación del flujo de arena.

Tabla 2.9. Resultados obtenidos para la verificación del flujo de arena. Tomado de los autores

Prueba #	Cantidad pesada (g)	Tiempo de Vaciado (s)
1	500	102
2	500	105
3	500	99
Tiempo promedio		102

Se verificó entonces que el flujo de arena a través de la boquilla cumple con lo establecido en la Norma, el resultado obtenido se halla dentro del intervalo estipulado.

- Para la comprobación del buen funcionamiento del temporizador (parte del equipo de ensayo que detiene el movimiento del sistema de desgaste en un tiempo determinado) se puso en funcionamiento para un tiempo de 3 min. Se verificó, mediante un cronómetro, que ese fuese el tiempo real de operación.. Se observó que tanto el cronómetro empleado como el temporizador alcanzaban de forma simultánea el tiempo previsto para la prueba.
- Para la aplicación de la carga se procedió a medir el brazo de palanca de la máquina, es decir, la distancia desde el pivote de giro hasta el punto en el que se aplica la carga mediante las pesas disponibles. Véase la Tabla 2.10 en la cual se listan los valores de carga según el tipo de ensayo a realizar.

Se puede observar que según el tipo de ensayo que se desee realizar habrá que modificar la carga aplicada (el peso) en el porta pesas.

*Tabla 2.10. Valores de carga en función del tipo de ensayo.
Tomado de ASTM G65-C*

Según Norma					
Ensayo tipo	Fuerza (N)	Velocidad de la rueda (rpm)	Abrasión lineal (m)	Peso (Kg.)	Tiempo (min.)
A	130	6000	4309	5.145	30
B		2000	1436		10
C		100	71,8		0,5
D	45	6000	4309	1.543	30

Véase la Figura N° 2.18 en ella se pueden identificar las partes del equipo empleado para la realización de los ensayos de desgaste abrasivo. Esta máquina cumple con los requisitos exigidos por la Norma.

Una vez que las probetas están listas para la realización de los ensayos (recubiertas, limpias y secas), y tanto el equipo como la arena cumplen con los parámetros exigidos, se procede a aplicar el método de desgaste especificado según la Norma ASTM G65-C, para ello se siguieron los pasos que se listan a continuación:

- Se vació la arena de cuarzo redondeado, en la tolva superior de la máquina de ensayo, manteniendo cerrado el paso de arena hacia la boquilla.
- Se aplicó la carga necesaria en el brazo de palanca, según el tipo de ensayo a realizar. Véase Tabla 2.9.
- Se colocó la probeta en el porta probetas y se ajustó firmemente.
- Se ajustó el tiempo para el ensayo.
- Se abrió el paso de arena hacia la boquilla.
- Se inició el ensayo.
- Al finalizar el tiempo se detuvo el motor de forma automática, se cierra el paso de arena, se retira la probeta, se limpia, se pesa y se guarda en el desecador.
- Se debe dejar enfriar la rueda antes de proceder al siguiente ensayo. Para los ensayos realizados bajo el procedimiento tipo B se debe dejar enfriar un tiempo de aproximadamente 30 min, de modo de permitir que ésta alcance la temperatura ambiental antes de proceder con el siguiente ensayo.

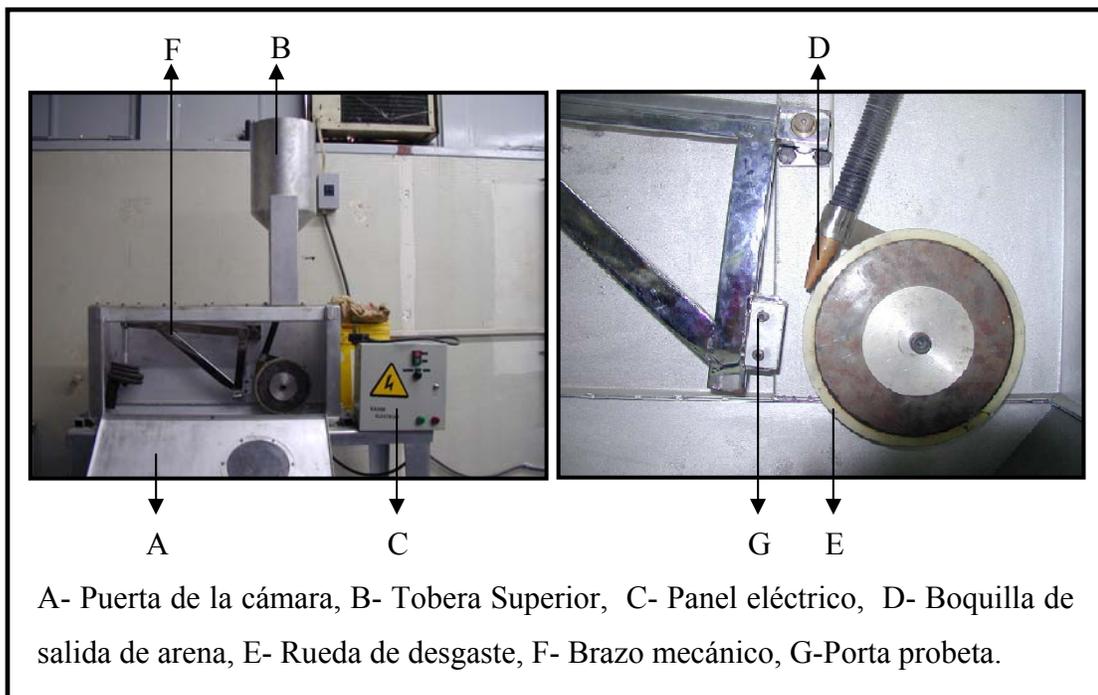


Figura N° 2.18. Máquina de Ensayo Abrasivo. Tomado de los autores

2.10.1.- Cálculos realizados para el ensayo de abrasión:

Primero se llevo la pérdida de masa a volumen perdido, dividiendo la masa perdida entre la densidad del recubrimiento, como se muestra a continuación:

$$V_p[\text{mm}^3] = \frac{mp[\text{gr}]}{\rho[\text{gr}/\text{mm}^3]} \quad \text{en la cual:}$$

ρ es la densidad del recubrimiento que se está depositando.

$mp = mae - mde$ donde: mp es la masa perdida en el ensayo en gramos
 mae es la masa antes de ensayar en gramos
 mde es la masa después de ensayar en gramos

Para el cálculo de la densidad del recubrimiento se utilizó el método descrito en la sección 2.8.3. La elección del método se realizó en función del menor número posible de errores que implicase su aplicación. A criterio propio consideramos el método de la inmersión del recubrimiento como el más preciso de los enunciados anteriormente.

Luego se realizó el cálculo del volumen perdido corregido según el diámetro de la rueda al final del ensayo, ya que ésta sufre un desgaste que debe de ser cuantificado.

Para ello:

$$V_{pc} = \frac{V_p[\text{mm}^3]}{D_{fr}[\text{mm}]} * 228.6\text{mm} \quad \text{donde: } V_{pc} \text{ es el volumen perdido corregido}$$

V_p es el volumen perdido
 D_{fr} es el diámetro de la rueda después del ensayo
228,6 es el diámetro original de la rueda (ctte)

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.- ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD

La Tabla 3.1 contiene los resultados de la rugosidad para cada uno de los recubrimientos obtenidos antes de la realización de los ensayos de abrasión y erosión. Estos valores son el resultado del promedio de tres medidas tomadas a lo largo de las muestras una vez recubiertas y rectificadas.

Tabla 3.1 Valores de la rugosidad para los diversos materiales en μm .

Materiales	Nomenclatura	Rugosidad en μm	
		Promedio	Desviación
(WC-12%Co)+80%Colmonoy88 [®]	Recu I	0,1900	0,0333
(WC-12%Co)+80%Colmonoy88 [®] TT	Recu I TT	0,1633	0,0156
(WC-10%Co)+4%Cr	Recu II	0,0667	0,0111
Acero AISI 1020	Acero	0,7133	0,2622

A partir de los datos obtenidos puede observarse que el Acero es el material que presenta la mayor rugosidad, siendo ésta 3,8 veces superior a la del Recu I, 4,4 veces superior a la del Recu I TT y 10,7 veces mayor que la del Recu II.

Se pudo determinar que el tratamiento térmico mejoró la rugosidad del recubrimiento en un 14%. Esto es debido probablemente a la densificación del material como consecuencia del tratamiento térmico.

Véase la Figura N° 3.1 en la cual se presentan de forma gráfica los valores tabulados para la rugosidad de los materiales, mostrados en la tabla anterior.

También debemos acotar que la rugosidad obtenida para cada uno de los materiales cumple con los parámetros exigidos por la Norma para la correcta realización de los ensayos.

En cuanto a la desviación presentada por los valores obtenidos, tal y como se refleja en la Tabla anterior, el recubrimiento que muestra el mayor valor es el Recu I. Esto es de esperar ya que éste es el que tiene la estructura más irregular, es decir, tal y como

se verá a continuación es el menos denso y el que presenta más irregularidades en la distribución de sus fases.

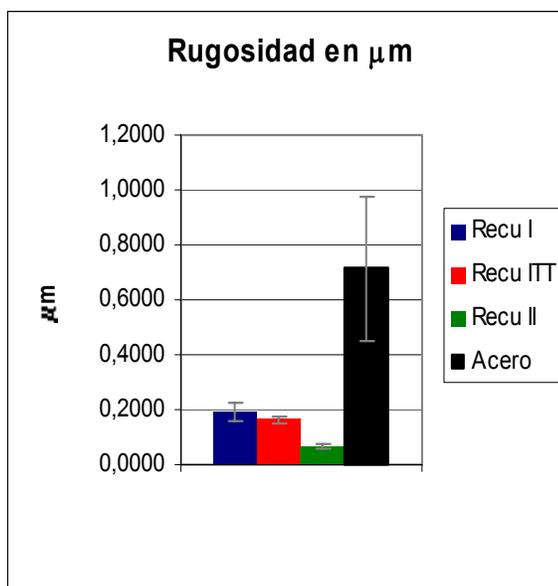


Figura N° 3.1 Valores de la rugosidad para los diversos materiales en μm .

3.2.- ANÁLISIS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En las imágenes subsecuentes se muestran las Figuras referentes a la MEB. En ellas se podrán observar los diferentes contrastes composicionales característicos (MEB en electrones primarios) para cada uno de los recubrimientos empleados y en algunos casos se podrá saber la composición química existente mediante el uso de la Espectroscopía por Dispersión de Energía en rayos X (EDS).

La Figura N° 3.2 corresponde a una micrografía (MEB) en la cual se muestra una vista general del Recu I con la interfase existente entre el recubrimiento y el metal base. En ella se puede observar la distribución heterogénea de las fases y la buena adhesión del recubrimiento con respecto al sustrato evidenciada mediante la reproducibilidad de la superficie del sustrato por parte del recubrimiento. La porosidad observada en la interfase corresponde a las huellas dejadas por el proceso de granallado.

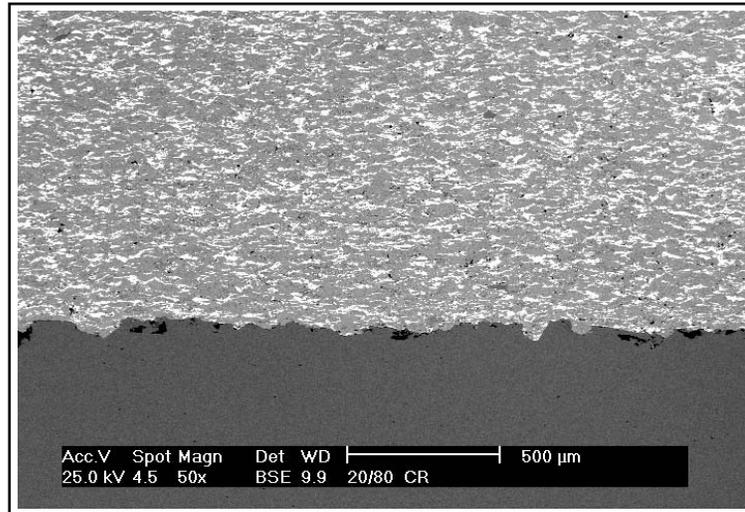


Figura N° 3.2 MEB. Recu I, aumento 50x. Tomado de los autores.

La Figura N° 3.3 corresponde al mismo Recu I con una magnificación de 500x. En ella se pueden observar de forma clara 3 gotas de material semi fundido (A, B, C) que no lograron la coalescencia total con el resto del recubrimiento, por ende quedaron atrapadas en su interior. Obsérvese también la disposición lamelar de las fases de WC (D) a lo largo del recubrimiento, producto de la aplicación consecutiva de capas para la elaboración del depósito.

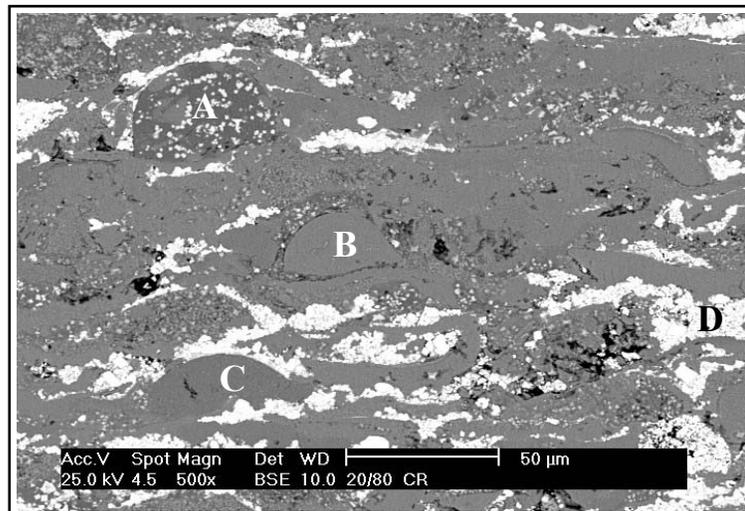


Figura N° 3.3 MEB. Recu I, aumento 500x. Tomado de los autores.

La Fig N° 3.4 corresponde a una magnificación de 1500x del Recu I (específicamente en el detalle A de la Figura N° 3.3). En ella se aprecia una gota ampliada y sus alrededores, también el aspecto lamelar característico de estos recubrimientos (B).

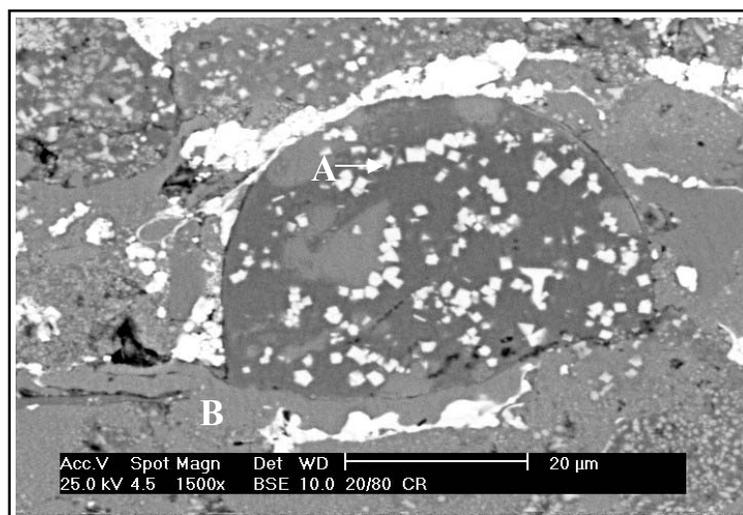


Figura N° 3.4 MEB. Recu I, aumento 1500x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.5 se muestra el resultado obtenido a partir de un EDS realizado sobre la gota de la Fig N° 3.4, en él puede apreciarse la elevada concentración de Ni y W existente. Ya que el equipo no detecta C consideraremos que cuando se presenten concentraciones de W realmente la fase presente será WC no W como elemento aislado.

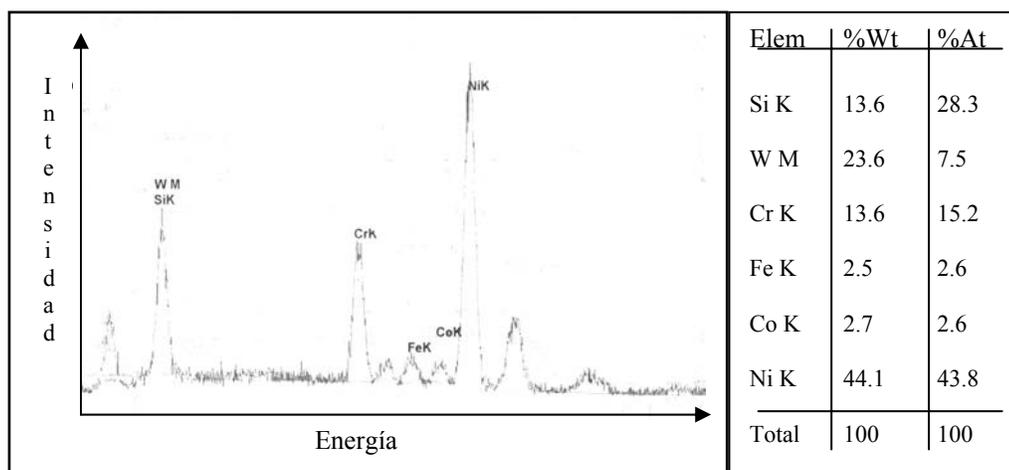


Figura N° 3.5 MEB. Recu I, análisis químico del detalle A indicado sobre el aumento 1500x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.6 se puede observar el Recu I con una ampliación de 2000x, la cual permite identificar los elementos presentes Ni, W y Cr (A, B, C respectivamente)

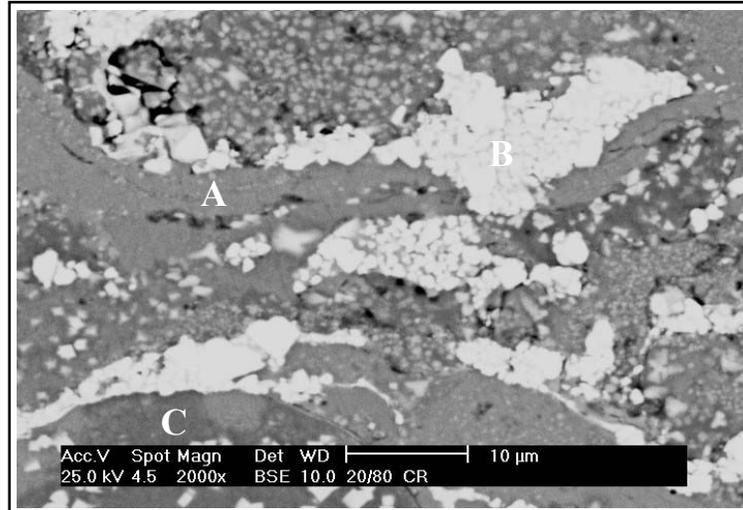


Figura N° 3.6 MEB. Recu I, aumento 2000x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.7 se muestra la vista general del Recu I TT en el cual no evidenció difusión entre el recubrimiento y el metal base. Se puede apreciar la redistribución de las fases producto del tratamiento térmico y la reproducción de la superficie del sustrato por parte del recubrimiento. Hay una distribución uniforme de los componentes en una fina dispersión a lo largo del recubrimiento. Nótese la diferencia con la Figura N° 3.2.

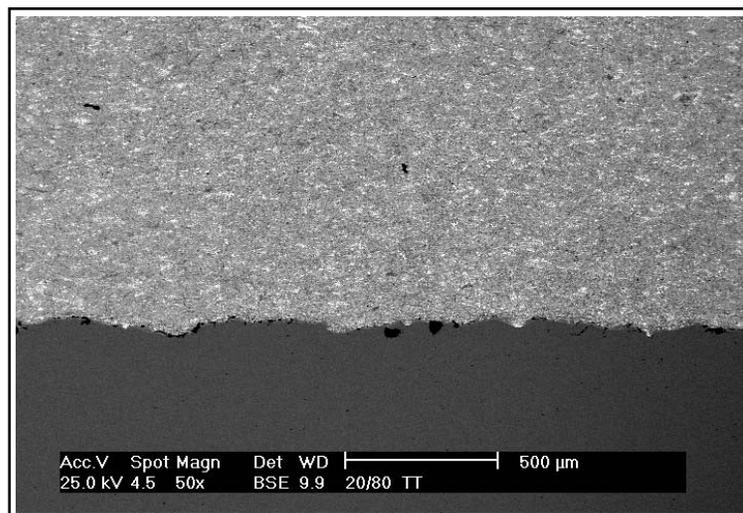


Figura N° 3.7 MEB. Recu I TT, aumento 50x. Tomado de los autores.

La Figura N° 3.8 muestra la fina dispersión de los componentes descrita en el párrafo anterior e indica un detalle (A) del cual se realizó un análisis químico cuyos resultados se ilustran en la Figura N° 3.9.

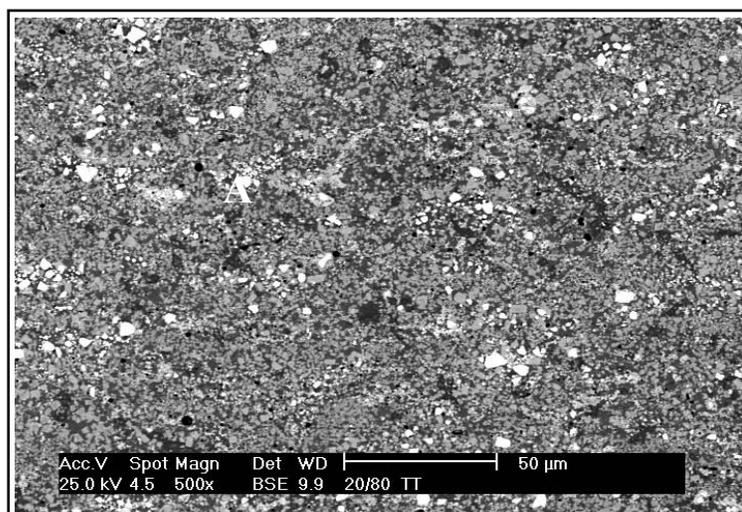


Figura N° 3.8 MEB. Recu I TT, aumento 500x. Tomado de los autores.

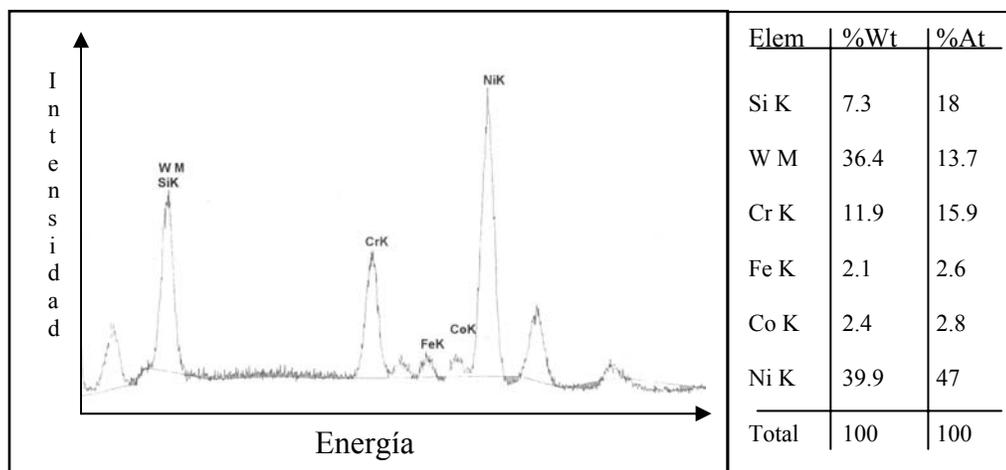


Figura N° 3.9 MEB. Recu I TT, análisis químico del detalle indicado sobre el aumento 500x. Tomado de los autores.

Es importante destacar que la micrografía mostrada en la Figura N° 3.8 no presenta gotas semi fundidas como las observadas en el estudio del Recu I, esto puede indicar que se produjo una densificación del recubrimiento producto del tratamiento térmico posterior que fue aplicado.

De igual forma puede observarse la diferencia en cuanto a la distribución de los carburos la cual pasa de una forma lamelar a una dispersión uniforme después del tratamiento térmico.

En la Figura N° 3.10 se puede observar el Recu I TT con una ampliación de 2000x, la cual permite la identificación de los componentes presentes W, Ni y Cr (A, B y C respectivamente).

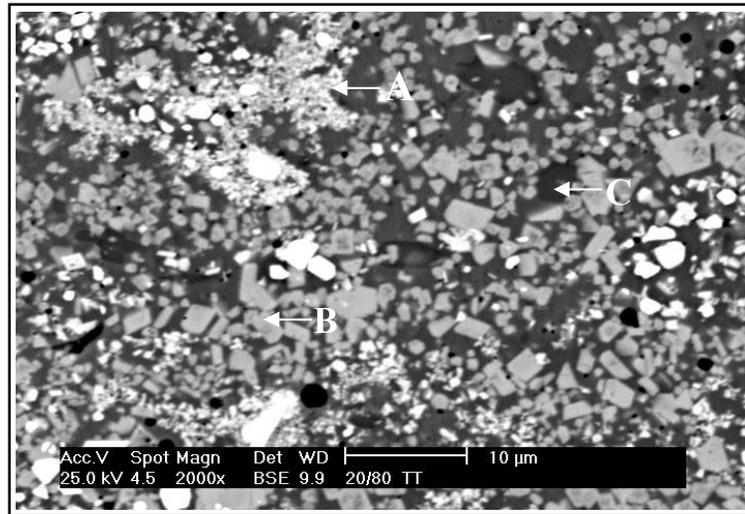


Figura N° 3.10 MEB. Recu I TT, aumento 2000x. Tomado de los autores.

Sobre la Figura N° 3.10 se realizó un EDS sobre el detalle indicado (A) a partir del cual se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura N° 3.11, la cual refleja la elevada concentración de W presente.

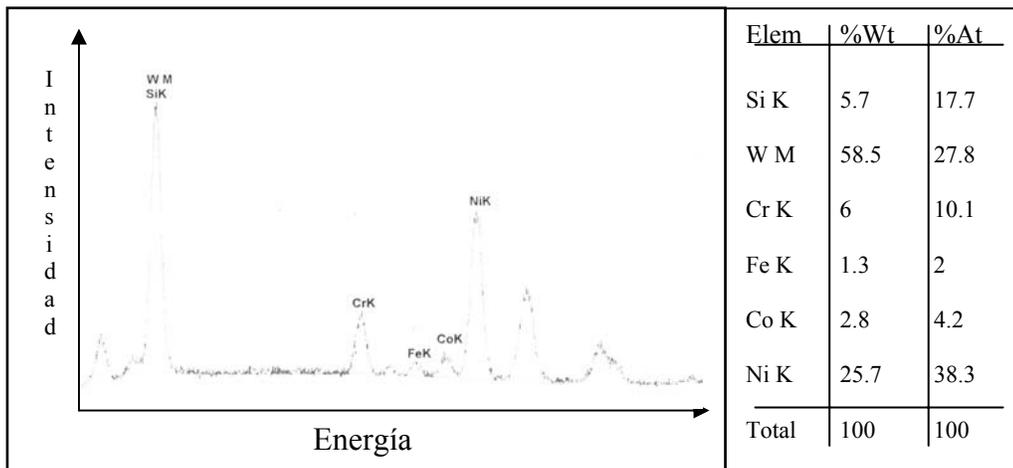


Figura N° 3.11 MEB. Recu I TT, análisis químico del detalle A indicado sobre el aumento 2000x. Tomado de los autores.

La Figura N° 3.12 muestra una vista general del Recu II que permite apreciar la fina dispersión de las fases a lo largo del recubrimiento, además de unas fases oscuras de dimensiones variables. Aparentemente existe una buena adherencia entre el sustrato y el recubrimiento.

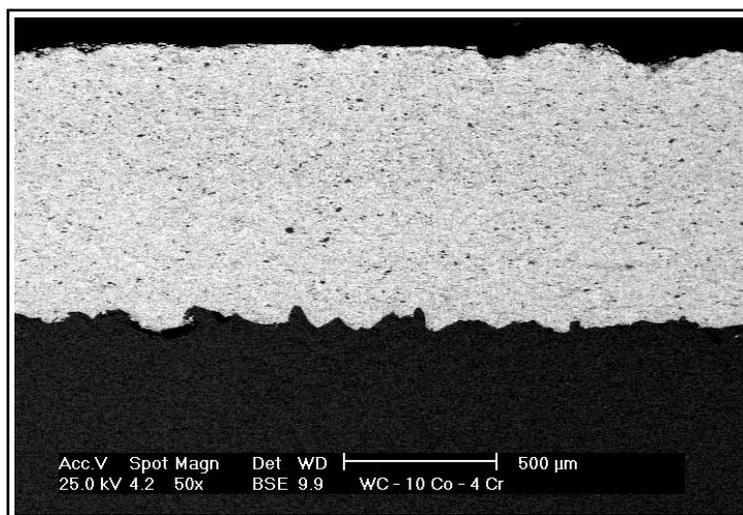


Figura N° 3.12 MEB. Recu II, aumento 50x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.13 se muestra una ampliación a 500x del Recu II, en ella se aprecian algunas lamelas aunque puede decirse que las fases están uniformemente distribuidas. Los componentes predominantes son el Cr, W y Co (A, B y C respectivamente) según los EDS realizados.

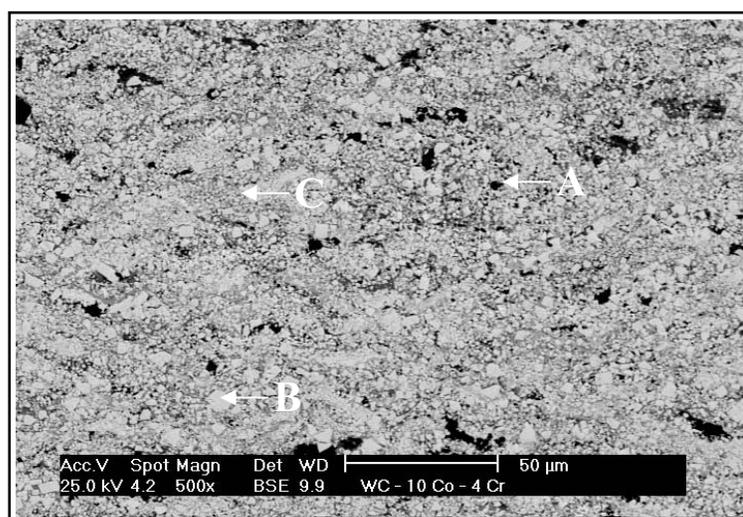


Figura N° 3.13 MEB. Recu II, aumento 500x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.14 se muestra el detalle A de la Figura anterior con una magnificación de 1500x. En general se presenta una fina distribución de WC. En esta ampliación se realizó un EDS cuyos resultados se ilustran en la Figura N° 3.15, el cual indica que la fase se encuentra formada principalmente por Cr y Co. Posiblemente esta fase corresponde a una partícula de material que no llegó a fundir durante el proceso de deposición.

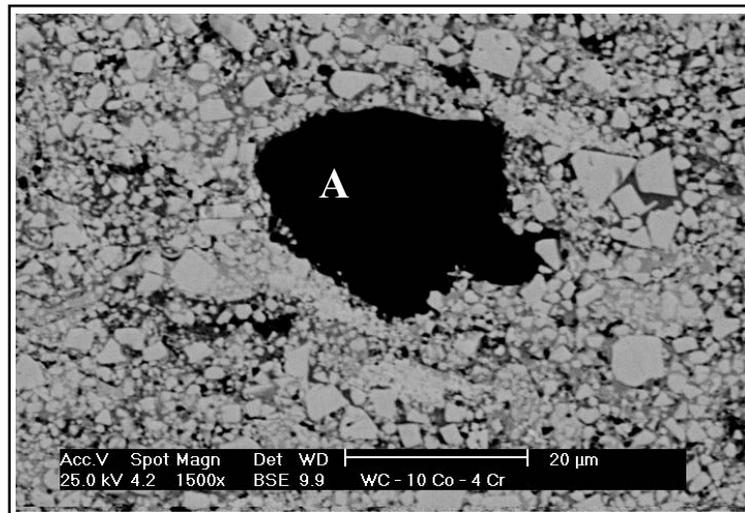


Figura N° 3.14 MEB. Recu II, aumento 1500x. Tomado de los autores.

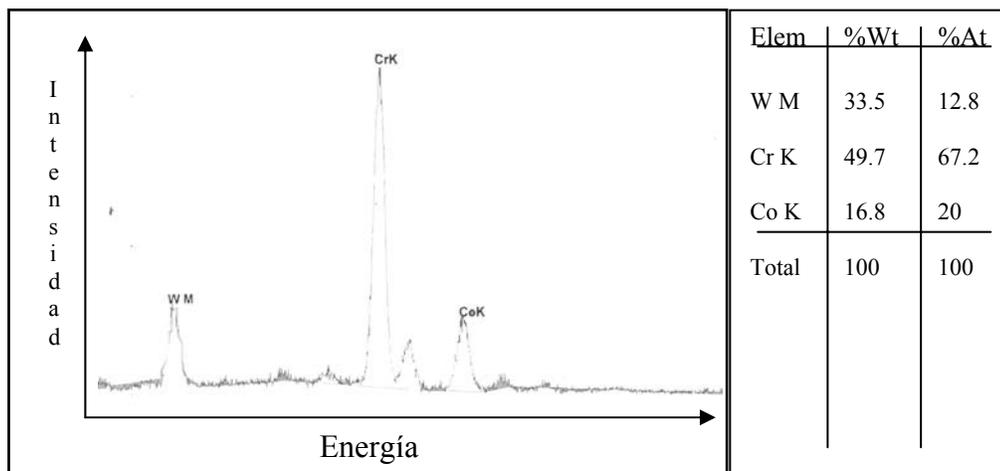


Figura N° 3.15 MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado sobre el aumento 1500x. Tomado de los autores.

En el Recu II las fases de carburos se encuentran finamente distribuidas a lo largo del recubrimiento (Ver la Figura N° 3.16). Pueden observarse algunas aglomeraciones de partículas pequeñas (A), pero en general la distribución es uniforme y dispersa. Tal y como es de esperarse por la composición química de los polvos en este caso se presenta una cantidad de WC (A y B) mayor a la de los Recu I y Recu I TT.

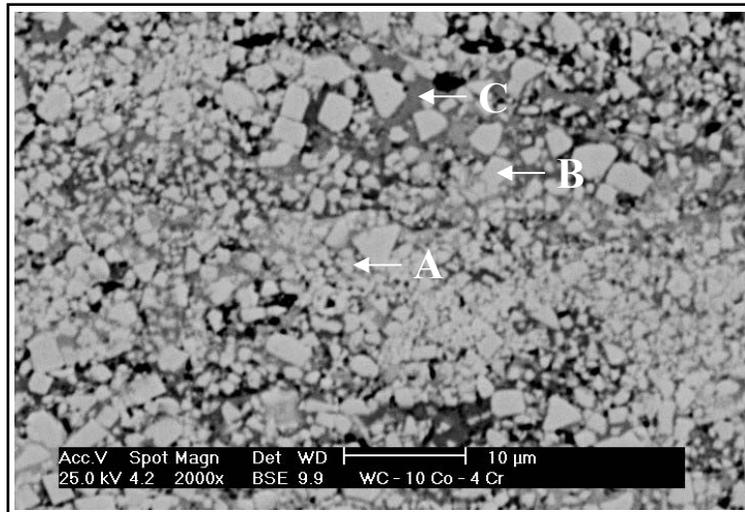


Figura N° 3.16 MEB. Recu II, aumento 2000x. Tomado de los autores.

En la Figura N° 3.17 se muestra un EDS llevado a cabo sobre el detalle B de la ampliación a 2000x del Recu II. Obsérvese la alta composición en cuanto a W.

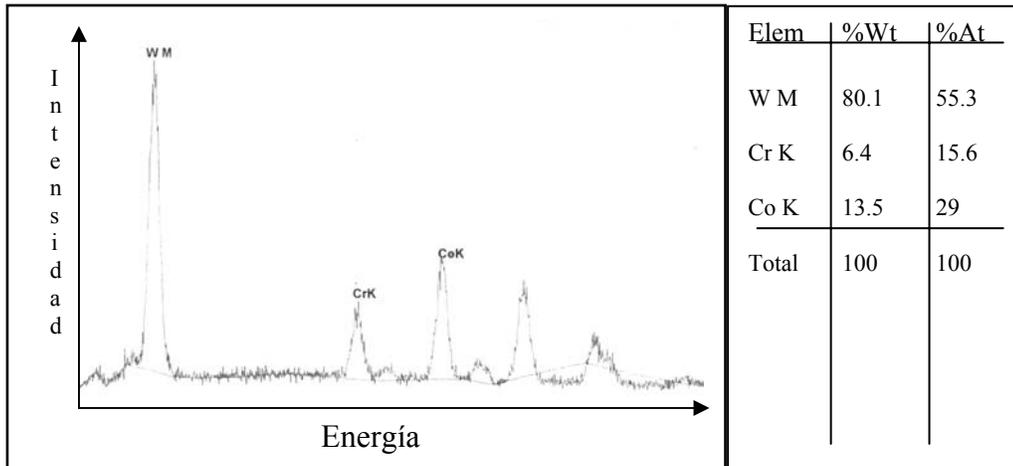


Figura N° 3.17 MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado (zona gris clara) sobre el aumento 2000x. Tomado de los autores.

Cuando se consideró sobre la misma Figura N° 3.16, la zona gris oscura identificada con la letra C, el EDS dio como resultado una elevada concentración de Co (Figura N° 3.18), lo que sugiere la existencia de una tercera fase en la que él es el elemento mayoritario.

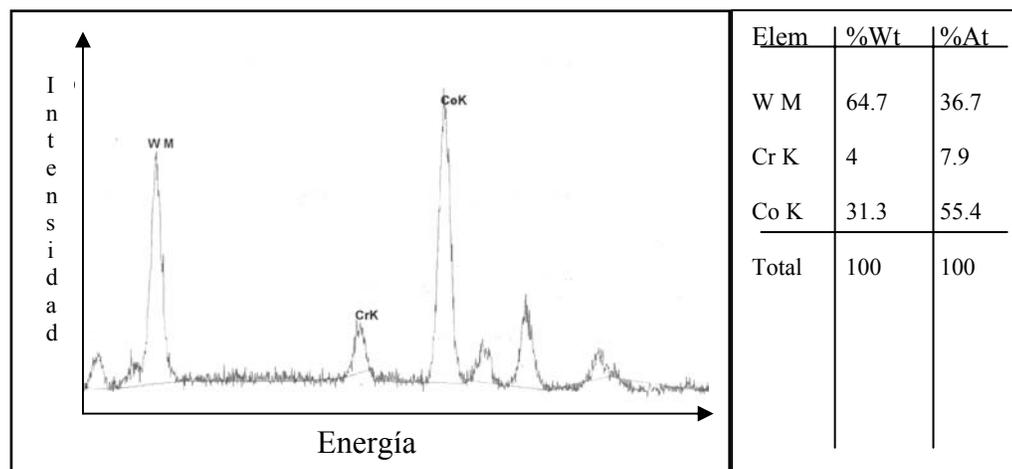


Figura N° 3.18 MEB. Recu II, análisis químico del detalle indicado (zona gris oscura) sobre el aumento 2000x. Tomado de los autores.

3.3.- ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE LOS DISTINTOS RECUBRIMIENTOS

A continuación se presenta la Tabla 3.2 en donde se pueden observar los cuatro valores de densidad para cada uno de los recubrimientos, obtenidos a través de los diversos métodos empleados. Es de notar que los resultados presentan un comportamiento bastante uniforme, es decir, que las discrepancias existentes entre los métodos empleados son pequeñas. También se puede ver que el tratamiento térmico posterior que le fue aplicado al Recu I ocasionó un aumento en la densidad del mismo. Se considera que este aumento de la densidad es producto de la reorganización estructural del recubrimiento, es decir, disminución de las porosidades y compactación de las fases presentes.

Tabla 3.2 Densidad en $\text{gr/mm}^3 \times 10^{-3}$ de los diferentes materiales utilizados.

MATERIALES	METODO 1	METODO 2	METODO 3	METODO 4
WC-10%Co+4%Cr	10,2	9,9	12,3	11,0
WC-12%Co+80% Colmonoy 88®T.T.	9,8	8,9	7,7	10,4
WC-12%Co+80% Colmonoy®	8,3	7,7	5,6	8,9

En la Figura N° 3.19 se muestran graficados los resultados reportados en la Tabla anterior.

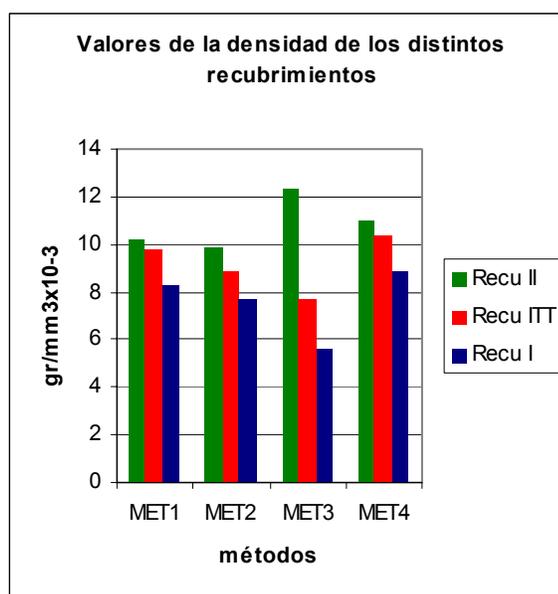


Figura N° 3.19 Densidad de los diferentes materiales utilizados.

3.4.- ANÁLISIS DE LA MICRODUREZA

A continuación se muestra la Tabla 3.3 en donde están reflejados los resultados de la microdureza de cada uno de los recubrimientos y del Acero. Estos valores son el resultado del promedio de 7 a 9 indentaciones realizadas en tres bandas verticales sobre el área del recubrimiento, distanciadas entre sí 100 μm .

Tabla 3.3 Valores de la dureza para los materiales estudiados.

Valores de Dureza Vickers		
Material	Dureza	Desviación Prom.
Recu I	653	100
Recu I TT	962	54
Recu II	920	120
Acero	233	26

En la Figura N° 3.20 se encuentran graficados los valores mostrados en la Tabla anterior. Puede observarse que la dureza de los recubrimientos es superior a la obtenida para el acero. La dureza del Recu I es 2,8 veces mayor que el del Acero, la del Recu I TT es 4,1 veces mayor que la del Acero y la del Recu II es 3,9 veces mayor que la del Acero. Igualmente se puede decir que la dureza del Recu I TT es 1,5 veces mayor que la del Recu I

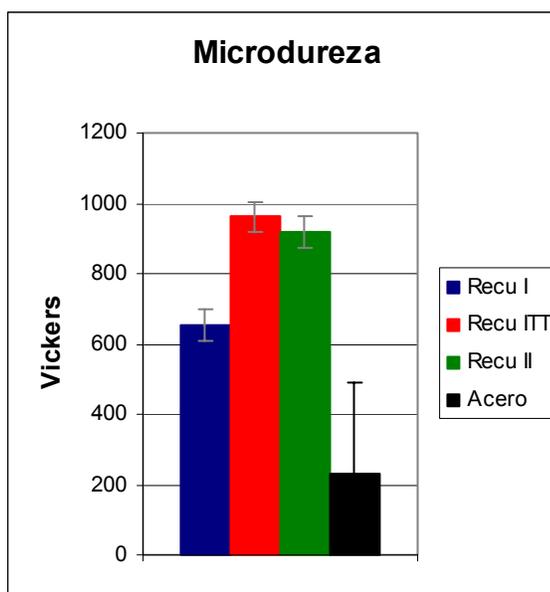


Figura N° 3.20 Valores de dureza Vickers para los materiales estudiados.

Si se comparan estos resultados con los presentados con anterioridad (valores de densidad) en la Tabla 3.2, se puede observar que la microdureza no depende rígidamente de la densidad, ya que el recubrimiento que presentó mayor dureza fue el

Recu ITT, y el de mayor densidad fue el Recu II. A continuación se muestra la Figura N° 3.21 en donde se puede observar el comportamiento.

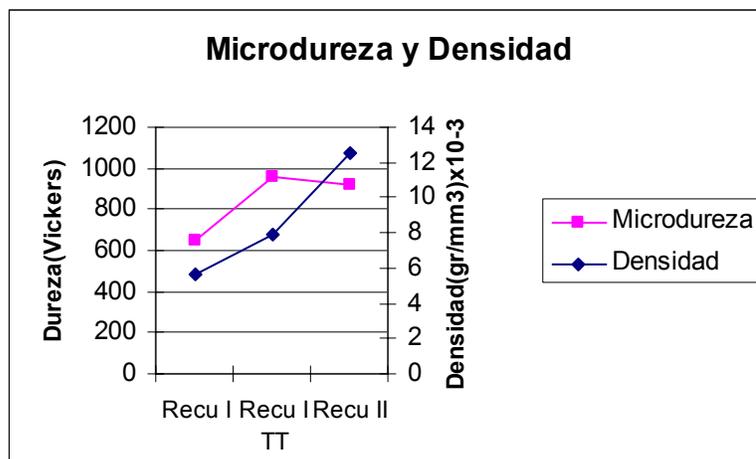


Figura N° 3.21. Comparación entre Microdureza y densidad de los recubrimientos estudiados.

3.5.- ENSAYO DE EROSIÓN

En la Tabla 3.4 se pueden observar los resultados de la pérdida de masa de las probetas ensayadas para cada uno de los recubrimientos y para el Acero. Los valores mostrados en la tabla, son el promedio de tres mediciones realizadas para cada caso. Al lado de cada valor se tiene su desviación promedio.

Tabla 3.4 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales en erosión.

Material	Pérdida de masa (grs)						
	3min	Desv. Prom.	6min	Desv. Prom.	9min	Desv. Prom.	
Recu I	0,1491	0,0063	0,1603	0,0040	0,1651	0,0028	45°
Recu ITT	0,1439	0,0038	0,1521	0,0030	0,1575	0,0041	
Recu II	0,1451	0,0020	0,1478	0,0016	0,1494	0,0020	
Acero	0,0135	0,0003	0,0216	0,0003	0,0236	0,0005	
Recu I	0,1535	0,0043	0,1643	0,0028	0,1736	0,0060	60°
Recu ITT	0,1527	0,0039	0,1609	0,0009	0,1628	0,0012	
Recu II	0,1510	0,0056	0,1553	0,0039	0,1591	0,0042	
Acero	0,0130	0,0003	0,0186	0,0005	0,0226	0,0017	
Recu I	0,1585	0,0085	0,1748	0,0108	0,1756	0,0111	90°
Recu ITT	0,1568	0,0014	0,1607	0,0011	0,1643	0,0012	
Recu II	0,1572	0,0065	0,1600	0,0084	0,1626	0,0089	
Acero	0,0133	0,0006	0,0198	0,0009	0,0225	0,0023	

Si se enumera de forma decreciente en función de la pérdida de masa cada uno de los materiales ensayados quedaría: el Recu I con la mayor pérdida de masa, luego el Recu I TT, posteriormente el Recu II y finalmente el Acero. Para llevar esto a una escala numérica se puede decir que para un lapso de ensayo de 9 minutos y un ángulo de incidencia de 45° el Recu II presentó una pérdida de masa 6 veces mayor que el acero, para el Recu I TT se incrementó la pérdida siendo esta 6,7 veces mayor que el acero y finalmente para el Recu I la pérdida fue 7 veces mayor que el acero. Véanse las Figuras N° 3.22, 3.23, 3.24 en las cuales se muestra la pérdida de masa en función del ángulo y del tiempo para todos los materiales ensayados. El resultado obtenido para el Recu I y el Acero es muy similar al obtenido por los investigadores Malaver (1995) y García (1998), mientras que el obtenido para el Recu I y el Recu I TT puede respaldarse mediante los trabajos de García (1998) y Ferrara (2001).

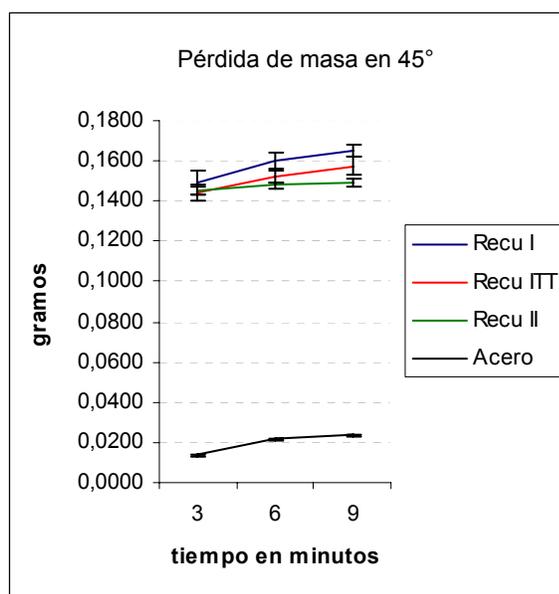


Figura N° 3.22 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 45° .

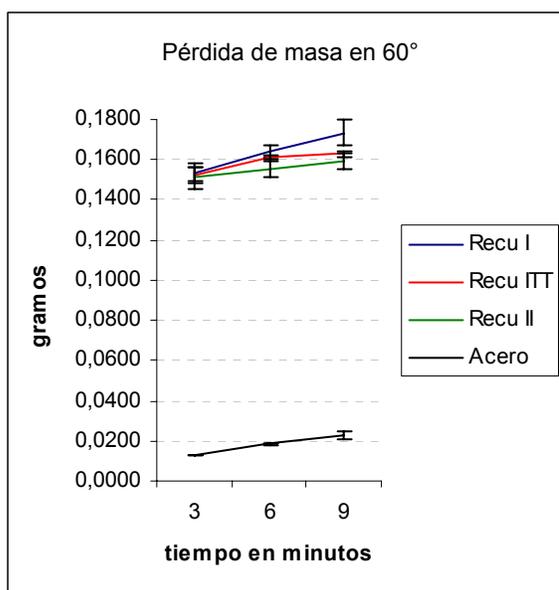


Figura N° 3.23 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 60°.

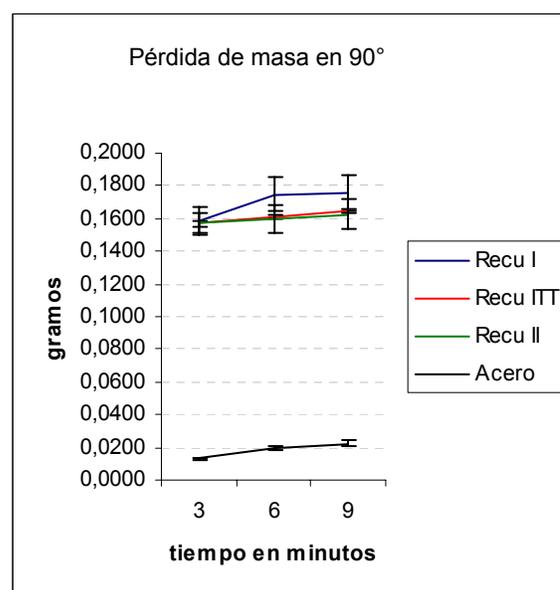


Figura N° 3.24 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados en 90°.

Particularizando en el estudio de cada uno de los materiales por separado podemos observar que sufren una pérdida de masa inicial abrupta (3 min) si se compara con las posteriores (6 y 9 min). Con esto se quiere decir que no se presentó un comportamiento lineal en función del tiempo para cada material en particular con respecto a la pérdida de masa. El caso del acero sería el único en el cual la pérdida de masa casi se duplica si se compara con el de 6 minutos, sin embargo, el resultado después de 9 minutos ya rompe la tendencia creciente inicial. Podemos justificar esta conducta con el endurecimiento que sufre la superficie debido al trabajo en frío originado por la fricción de los polvos.

Si se considera la pérdida de masa en función del ángulo de ataque de las partículas erosivas se presenta un comportamiento particular, pero también esperado, ya que se ha observado con anterioridad en los trabajos de Kosel (1992), Malaver (1995), García (1998), Lathabai (1998), Bangueses (2000) y Ferrara (2001). Se puede apreciar que la pérdida de masa se incrementa en función del ángulo para los materiales duros como lo son el Recu I, el Recu I TT y el Recu II, mientras que para

los materiales dúctiles, como el acero, disminuye a medida que se incrementa el ángulo de ataque. Esta conducta pudiera asemejarse a lo que ocurriría si tratáramos de incrustar un cincel en una esfera de acero o en una esfera de plomo, si incidimos a 90° en el plomo éste se deformará permitiendo la penetración con un desprendimiento muy bajo de material, en cambio, en el acero pudiéramos observar el desprendimiento de fragmentos con una penetración escasa. Si incidimos de forma tangencial sobre el plomo se obtendría el desprendimiento de una laja de material, mientras que en el acero, el cincel simplemente deslizaría sobre la superficie sin generar desprendimientos considerables.

Las Figuras N° 3.25, 3.26, 3.27 permiten observar que el tratamiento térmico mejora el comportamiento del Recu I ante el desgaste erosivo entre un 0,8% (3min, 60°) y un 8% para la mayor diferencia (6 min, 90°).

Véase la Figura N° 3.25, en la cual se puede observar que el Acero para un ángulo de 45° tuvo 11 veces menos pérdida de masa que el Recu II y llega a ser hasta 12 veces menos para un ángulo de 90°.

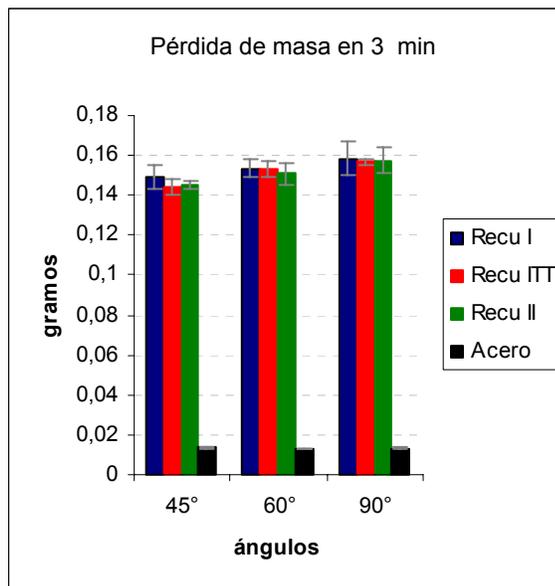


Figura N° 3.25 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.

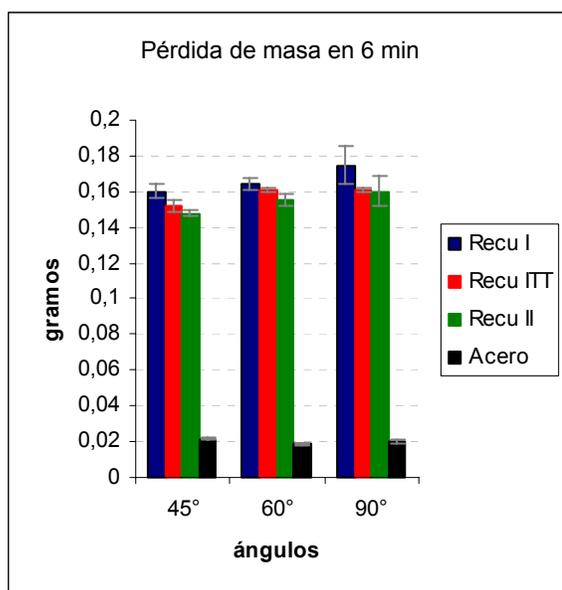


Figura N° 3.26 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.

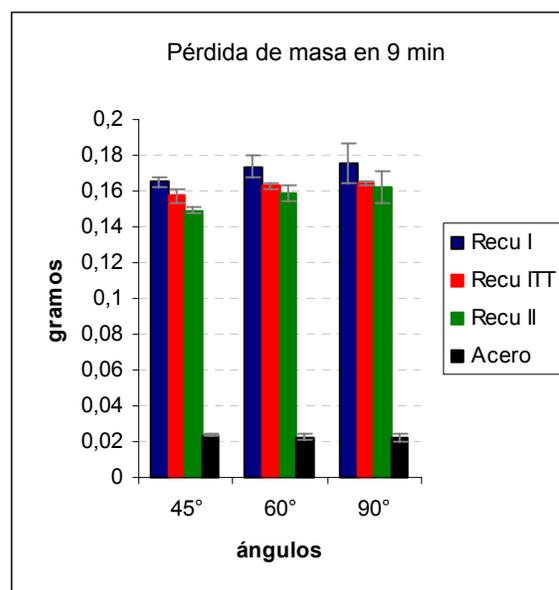


Figura N° 3.27 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.

El estudio en función del tiempo está estipulado en la Norma ASTM G76, sin embargo no había sido llevado a cabo en ningún trabajo de grado anterior. Eso nos permite discernir sobre el comportamiento que presentan los materiales en función de dicha variable.

La disminución en cuanto a la pérdida de masa al realizar tratamientos térmicos se puede justificar en el hecho de la densificación del material por efecto del calentamiento posterior, el cual le permite reorganizar sus fases para obtener una distribución fina de cada uno de sus componentes, así como la disminución de las porosidades, mejorando así sus propiedades mecánicas.

Para concluir en lo que respecta a la pérdida de masa podemos decir que el Recu I se desgastó entre 7 (9 min, 45°) y 12 (3 min, 90°) veces más que el Acero. Por otro lado, comparando al Recu II con el Acero, podemos observar que el Recu II se desgastó entre 6 (9 min, 45°) y 12 (3 min, 90°) veces más que el Acero.

En general se puede decir que la pérdida de masa por unidad de tiempo disminuye a medida que se incrementa la duración del desgaste erosivo, y que para los materiales

duros el desgaste aumenta a medida que se hace mayor el ángulo de ataque, mientras que para los materiales dúctiles el desgaste disminuye a medida que se aumenta el ángulo de ataque.

A continuación se mostrarán los resultados relativos a la tasa de erosión, con su respectiva Tabla y Figuras a fin de evaluar cada uno de los materiales estudiados.

Véase la Tabla 3.5 en la cual se listan todos los valores obtenidos a partir de los cálculos de la tasa de erosión, considerando todos los materiales, los tiempos y los ángulos de incidencia del erosivo, tal y como se hizo para la pérdida de masa.

Tabla 3.5 Tasa de erosión en mm³/gramos de los diferentes materiales en erosión.

Material	Tasa de erosión						
	3min	Desv. Prom.	6min	Desv. Prom.	9min	Desv. Prom.	
Recu I	0,0237	0,0010	0,0128	0,0003	0,0088	0,0001	45°
Recu ITT	0,0175	0,0005	0,0093	0,0002	0,0064	0,0002	
Recu II	0,0106	0,0001	0,0054	5,8252E-05	0,0036	4,8004E-05	
Acero	0,0015	1,2798E-06	0,0012	0,00001	0,0009	5,0067E-06	
Recu I	0,0244	0,0007	0,0131	0,0002	0,0092	0,0003	60°
Recu ITT	0,0186	0,0005	0,0098	5,6875E-05	0,0066	4,7847E-05	
Recu II	0,0110	0,0004	0,0057	0,0001	0,0039	0,0001	
Acero	0,0015	5,9244E-07	0,0011	3,3336E-06	0,0009	7,5289E-06	
Recu I	0,0252	0,00135	0,0139	0,0009	0,0093	0,0006	90°
Recu ITT	0,0191	0,0002	0,0098	6,5000E-05	0,0067	0,00005	
Recu II	0,0114	0,0005	0,0058	0,0003	0,0039	0,0002	
Acero	0,0015	1,0987E-06	0,0011	6,3667E-06	0,0009	6,5778E-06	

Se puede observar que la tasa de erosión del Acero es inferior a la de los demás materiales (Recu I, Recu I TT, Recu II) repitiéndose así el comportamiento presentado, en el caso anterior, para la pérdida de masa. Es decir, en orden creciente en cuanto a la tasa de erosión se encuentra: en primer lugar el Acero, seguido por el Recu II, Luego el Recu I TT y finalmente el Recu I con la mayor tasa de erosión.

Este comportamiento puede ilustrarse mejor mediante las gráficas de tasa de erosión, en las cuales se aprecia que la posición relativa entre las curvas permanece inalterable si se compara con las obtenidas para la pérdida de masa. Véanse las Figuras N° 3.28,

3.29, 3.30 en las cuales se muestran las gráficas referentes a la tasa de erosión para cada uno de los materiales.

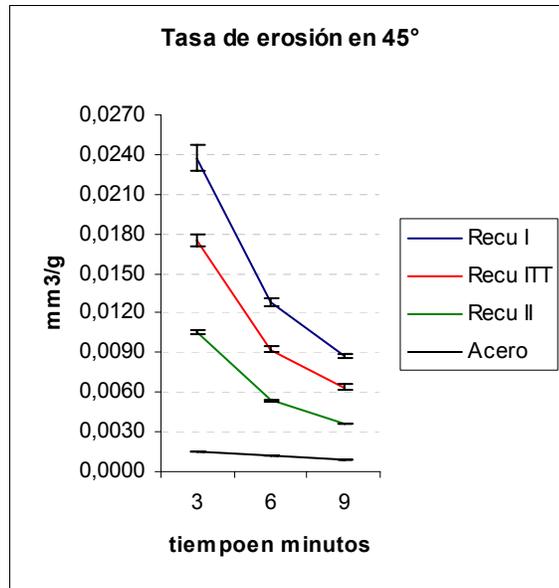


Figura N° 3.28 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados en 45° .

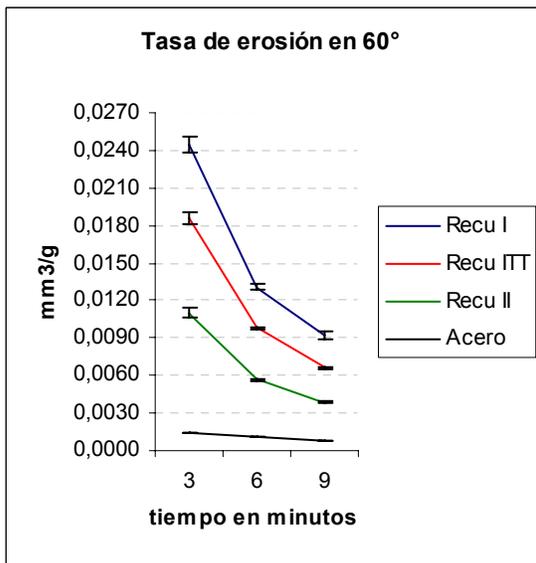


Figura N° 3.29 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados en 60° .

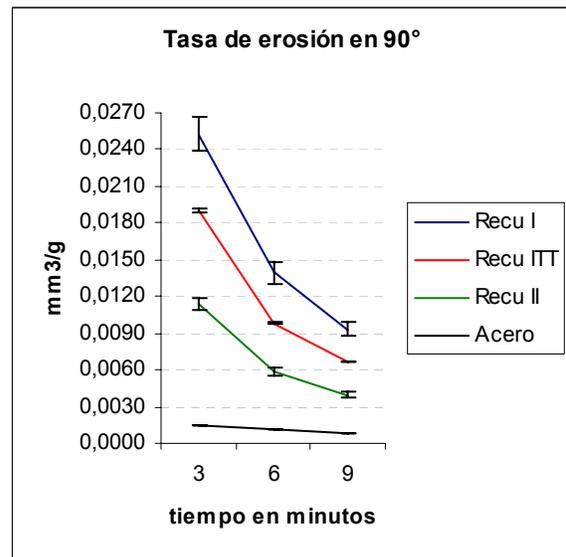


Figura N° 3.30 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados en 90° .

En las Figuras anteriores se puede observar que a pesar de mantenerse la misma posición relativa entre las gráficas éstas tienden a una configuración más uniforme en función del ángulo de ataque, es decir, las gráficas conservan sus tendencias al variar los ángulos. Si se considera que el Acero es un material con una cantidad de imperfecciones estructurales (porosidades, esfuerzos residuales, etc.) mucho menor que la de los recubrimientos resulta lógica la tendencia hacia la aproximación entre las gráficas, ya que se estaría tratando de hacer una aproximación hacia la evaluación de los materiales bajo las mismas condiciones estructurales. Esto se justifica por la intervención del valor de la densidad en los cálculos efectuados. Véase la Tabla 3.2.

En la Figura N° 3.31, se tiene el comportamiento de la tasa de erosión de los recubrimientos en la peor condición (9min, 90°), y los valores de la densidad; de donde se puede presumir la gran dependencia de la resistencia al desgaste erosivo con la densidad del material estudiado, ya que el Recu II presenta la mayor resistencia al desgaste erosivo y a su vez la mayor densidad entre los recubrimientos.

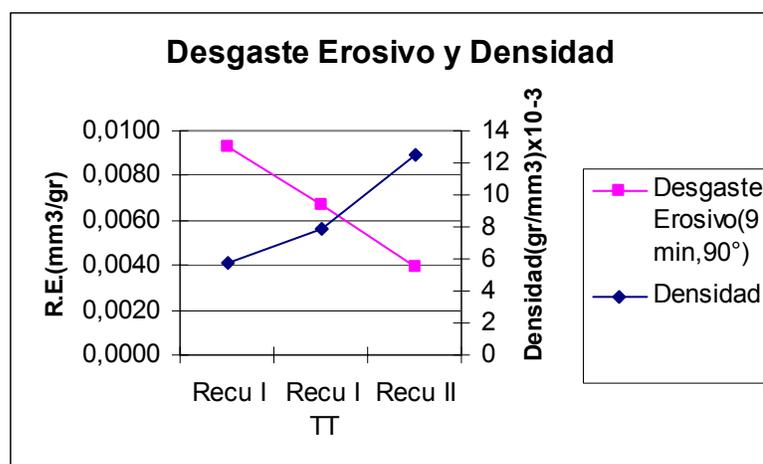


Figura N° 3.31. Comparación entre el desgaste erosivo y densidad de los recubrimientos estudiados.

Cabe anotar que los resultados en cuanto a la densidad no se pueden extrapolar al resto de los materiales, esto es un resultado puntual para los materiales en estudio.

Llevando esto a valores numéricos se puede decir que, para un ángulo de incidencia de 45° y un tiempo de ensayo de 9 min igual que se hizo para la pérdida de masa, la tasa de erosión para el Recu II es 4 veces mayor que para el Acero, mientras que la

del Recu I TT es 7,1 veces mayor y finalmente la del Recu I es 9,8 veces mayor. Véanse las Figuras N° 3.32, 3.33, 3.34 en las cuales se aprecia claramente la distribución escalonada y semi uniforme de los resultados obtenidos para la tasa de erosión en los diferentes tiempos y ángulos.

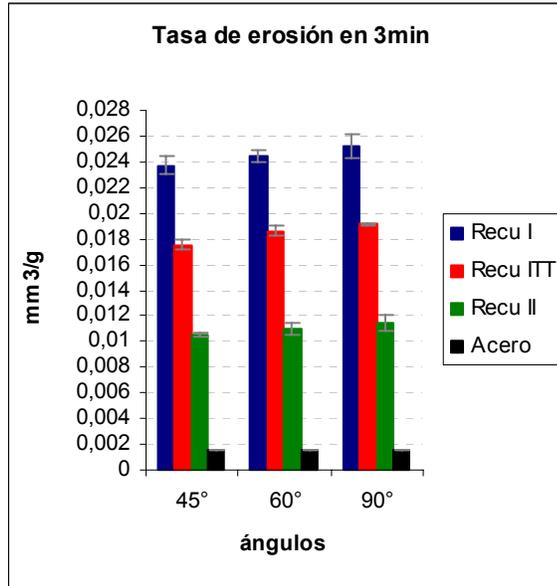


Figura N° 3.32 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.

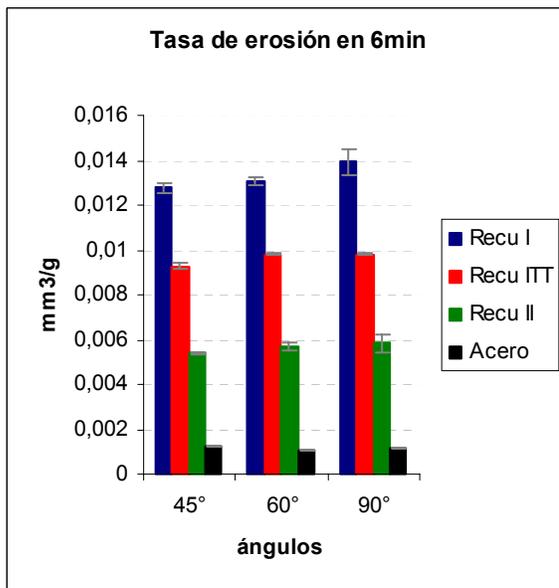


Figura N° 3.33 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.

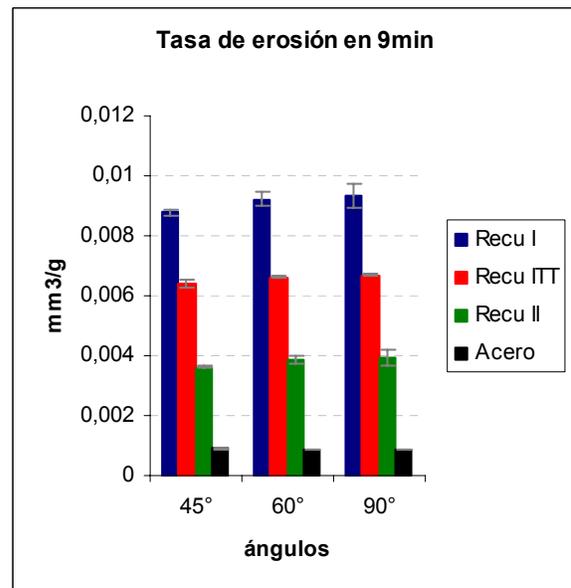


Figura N° 3.34 Tasa de erosión en $\text{mm}^3/\text{gramos}$ de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.

Si comparamos ahora de forma específica la tasa de erosión del Recu I con la del Recu I TT podemos decir que la del Recu I es 1,31 veces mayor que la del Recu I TT, para una condición de 3 min con un ángulo de 60°, y 1,42 veces mayor, para una condición de 6 min con un ángulo de 90°, que es la mayor diferencia.

Para el caso del Recu II se puede decir que la tasa de erosión es desde 4 veces mayor que la del Acero, para una condición de 9 min y 45°, hasta 7,5 veces mayor, para una condición de 3 min y 90°.

Al momento de comparar el comportamiento de los recubrimientos en la tasa de erosión, con el obtenido en el cálculo de la microdureza, Véase Figura N° 3.35, se aprecia que el desgaste erosivo no está íntimamente relacionado con la dureza de los materiales; ya que el Recu II se mantuvo por encima en la resistencia al desgaste con respecto al Recu ITT, a pesar que este último presentó una mayor dureza.

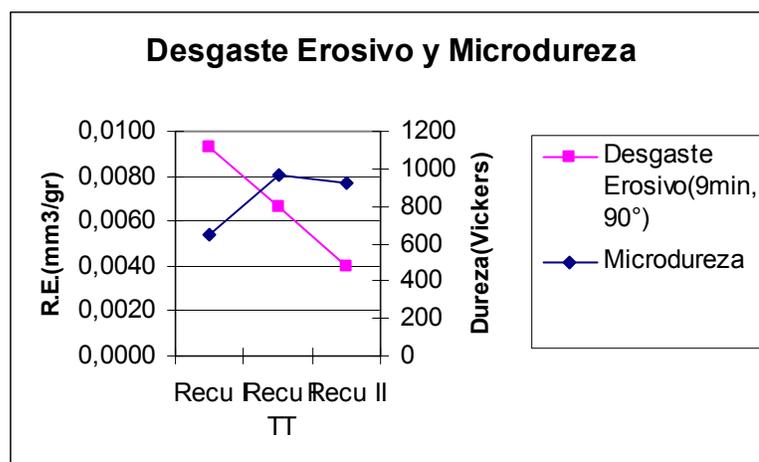


Figura N° 3.35. Comparación entre el desgaste erosivo y la microdureza de los recubrimientos estudiados.

En la Tabla 3.6 se listan los resultados obtenidos para el valor del Factor de Erosión Normalizado (FEN). Sabiendo que el FEN no es más que la comparación entre la tasa de erosión de cada uno de los recubrimientos con respecto al Acero, se puede decir que la posición relativa entre las gráficas de los recubrimientos va a permanecer igual que en el caso de la tasa de erosión, ya que se están afectando todos los valores por

una constante que viene representada por la tasa de erosión que se calculó para el acero.

Tabla 3.6 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales en erosión.

Material	FEN						
	3min	Desv. Prom.	6min	Desv. Prom.	9min	Desv. Prom.	
Recu I	15	0,6494	10	0,2587	10	0,1661	45°
Recu ITT	11	0,2991	7	0,1476	7	0,1861	
Recu II	7	0,0930	4	0,0470	4	0,0532	
Recu I	16	0,4583	12	0,2108	11	0,3715	60°
Recu ITT	12	0,3216	9	0,0533	8	0,0554	
Recu II	7	0,2724	5	0,1320	4	0,1168	
Recu I	17	0,8866	12	0,7561	11	0,6873	90°
Recu ITT	13	0,1083	9	0,0573	8	0,0567	
Recu II	8	0,3098	5	0,2679	5	0,2502	

Véanse las Figuras N° 3.36, 3.37, 3.38 en las cuales se muestra de forma gráfica los valores tabulados en la Tabla 3.6.

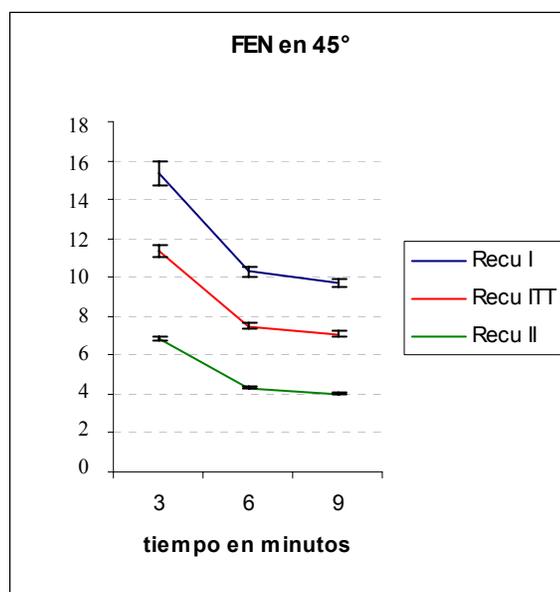


Figura N° 3.36 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados en 45°.

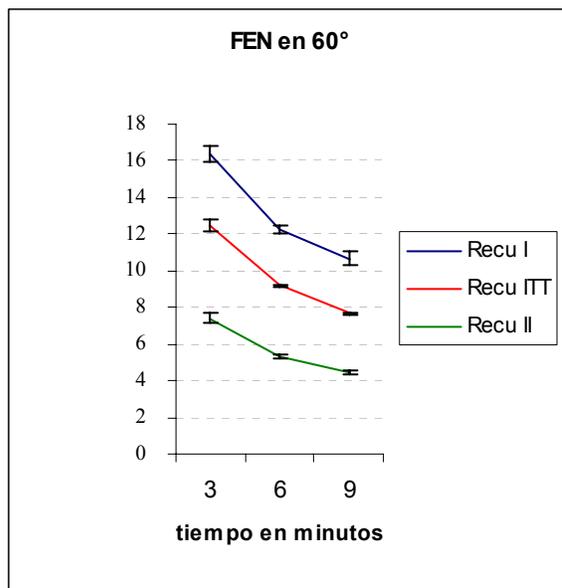


Figura N° 3.37 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados en 60°.

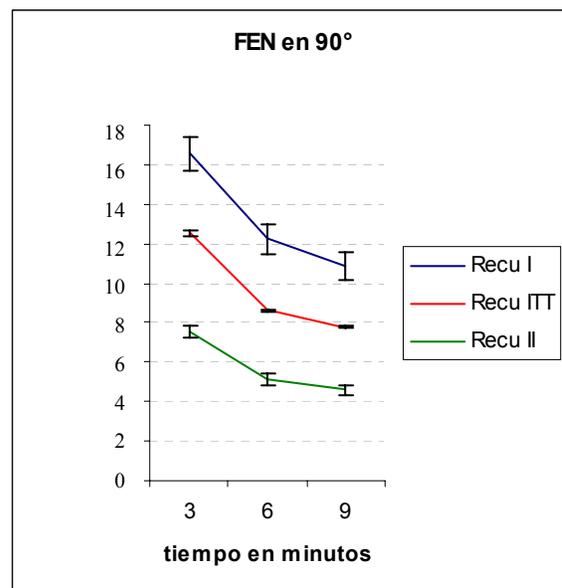


Figura N° 3.38 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensavados en 90°.

Véanse las Figuras N° 3.39, 3.40, 3.41 en las cuales se muestra la variación del FEN en función tanto del ángulo como del tiempo. En ellas las barras permiten observar claramente la tendencia creciente del FEN en función del ángulo de incidencia del erosivo para cada uno de los recubrimientos. Puede apreciarse que, tal y como se ha mencionado en párrafos anteriores, el ataque erosivo a un ángulo de incidencia de 45° presenta una variación notable con respecto a los ángulos de 60 y 90°, pudiéndose entonces alegar este hecho a la criticidad que representan dichos ángulos de ataque para los materiales frágiles (Recu I, Recu I TT, Recu II).

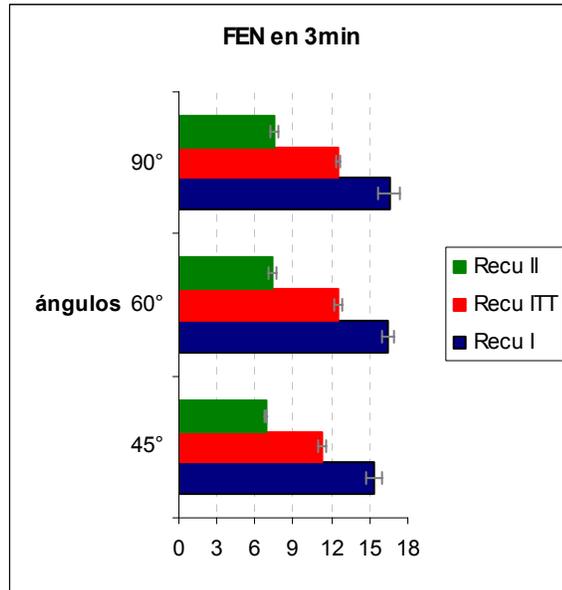


Figura N° 3.39 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 3 minutos.

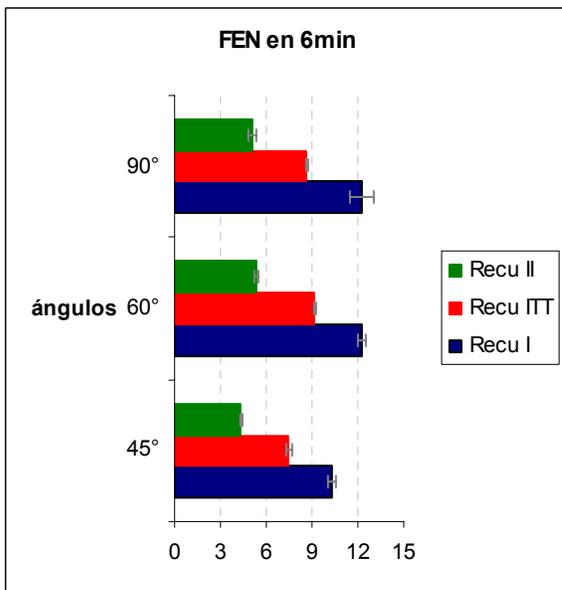


Figura N° 3.40 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 6 minutos.

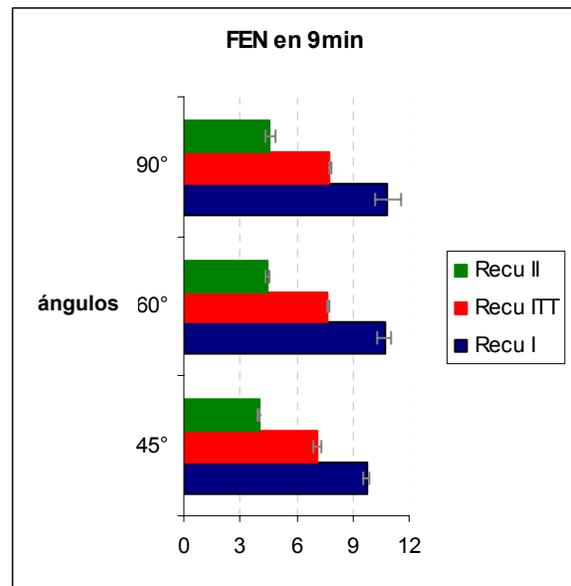


Figura N° 3.41 Factor de erosión normalizado de los diferentes materiales ensayados a los 9 minutos.

3.6.- ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN

En la Tabla 3.7 que se muestra a continuación se presentan los resultados de la pérdida de masa para cada uno de los materiales y tiempos estudiados. Cabe destacar que estos resultados son el promedio de los resultados obtenidos a partir de tres ensayos realizados.

Tabla 3.7 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales en abrasión.

Material	Pérdida de masa(grams)					
	5min	Desv. Prom	10min	Desv. Prom	30min	Desv. Prom
Recu I	1,3421	0,0147	1,4629	0,0032	2,0898	0,3362
Recu ITT	1,1769	0,0095	1,2045	0,0081	1,3164	0,0091
Recu II	1,2224	0,0436	1,2342	0,0139	1,3283	0,0403
Acero	2,0383	0,0345	2,6581	0,0021	4,7985	0,0757

Al momento de evaluar el desgaste abrasivo se puede apreciar a primera vista que los resultados son completamente inversos a los obtenidos en los ensayos erosivos, es decir, los materiales frágiles (Recu I, Recu I TT y Recu II) sufren una pérdida de masa muy inferior a la del material dúctil empleado (Acero 1020). Esto ratifica lo anteriormente dicho por los investigadores Pinto (1999), Klissan (2000), Ferrara (2001). Llevando esto a valores numéricos se tiene que el Acero presenta una pérdida de masa desde 1,52 hasta 2,30 veces más que el Recu I, desde 1,73 hasta 3,65 veces más que el Recu I TT y desde 1,67 hasta 3,61 veces más que el Recu II. La Figura N° 3.42 contiene la pérdida de masa en gramos para los diferentes materiales ensayados.

A partir de la Figura N° 3.42 puede apreciarse el beneficio otorgado por el tratamiento térmico posterior al Recu I. Véase que los valores graficados para el Recu I TT y el Recu II son muy similares entre sí para cada uno de los tiempos, en cambio el Recu I muestra siempre una pérdida de masa mayor que la de ellos dos. El Acero, por su parte, presenta la mayor pérdida de masa entre todos los materiales ensayados. Es importante resaltar también la estabilidad que presentan los valores de la pérdida de masa del Recu I TT y del Recu II en función del tiempo, es decir, en los primeros 5 minutos sufren una pérdida de masa abrupta en comparación con los ensayos de 10

y 30 minutos; mientras que tanto Recu I como el Acero disminuyen la pérdida por unidad de tiempo, pero no de una forma tan notoria.

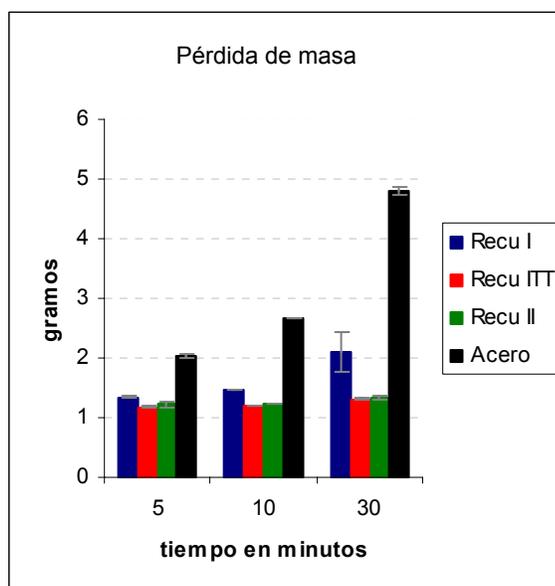


Figura N° 3.42 Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales ensayados.

Si se consideran los resultados arrojados por el Recu I y el Recu I TT, a fin de evaluar de forma específica el beneficio otorgado por el tratamiento, podemos decir que el Recu I pierde entre 1,14 y 1,59 veces más masa que el Recu I TT. Pudiera suponerse entonces que la densificación del material producto del tratamiento térmico y la redistribución de las fases le permiten al material (Recu I) mejorar sus propiedades mecánicas. Estos resultados corroboran los obtenidos por los investigadores Klissan (2000) y Ferrara (2001).

Ahora comparando el Recu I TT con el Recu II se observa que el Recu I TT pierde entre un 3,72 y un 0,89 % (para 5 y 30 min respectivamente) menos masa que el Recu II. Esto nos sugiere que las cualidades superficiales otorgadas por el tratamiento térmico, las cuales le permiten al Recu I TT tener una mayor resistencia al desgaste que el Recu II, van disminuyendo a medida que se penetra hacia el material base.

Debido a la disminución del diámetro del disco empleado para la aplicación del desgaste abrasivo, ya que las r.p.m. y el tiempo de ensayo permanecen constantes con

respecto a esta variable, hay que hallar la llamada rata de abrasión real. Esto permite corregir la pérdida de masa a partir de la diferencia entre el diámetro normalizado para el disco y el que tiene éste después de cada ensayo. Véase la Tabla 3.8 que refleja los valores de la pérdida volumétrica corregida a partir de la pérdida de masa, la densidad de los materiales ensayados y la variación en el diámetro del disco.

Tabla 3.8 Pérdida volumétrica corregida en mm³ de los diferentes materiales en abrasión.

Material	Pérdida volumétrica corregida(mm ³)					
	5min	Desv. Prom.	10min	Desv. Prom.	30min	Desv. Prom.
Recu I	245	2,7341	268	0,8632	378	59,8514
Recu ITT	166	1,2351	169	0,9534	187	2,7052
Recu II	102	3,6375	103	1,2368	113	4,7726
Acero	266	0,0333	359	0,1968	651	0,2801

A partir de la Tabla anterior y tal y como lo ilustra la Figura N° 3.43 puede observarse que la pérdida volumétrica resulta mayor para el Acero, luego le sigue el Recu I, posteriormente el Recu I TT y finalmente, con la menor pérdida, el Recu II. Este comportamiento pudiera justificarse en función, por supuesto, de la pérdida de masa y de los valores obtenidos para la densidad de los diversos materiales. Véase la Tabla 3.2 y la Figura N° 3.44, donde se presenta en esta última una comparación entre el desgaste abrasivo y la densidad.

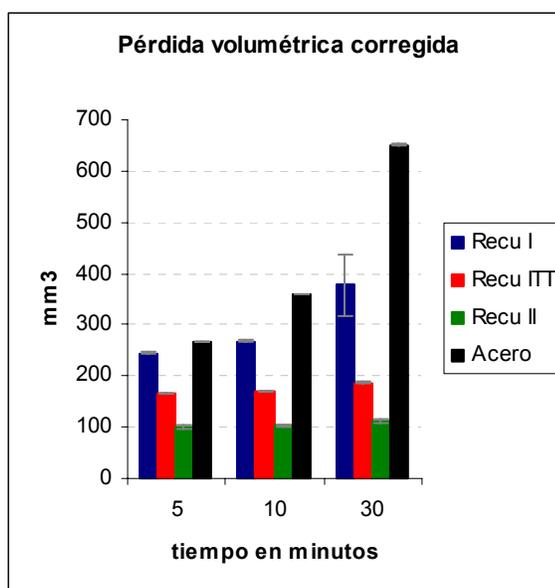


Figura N° 3.43 Pérdida volumétrica corregida en mm³ de los diferentes materiales ensayados.

Puede apreciarse también el aumento en cuanto a la diferencia existente entre los valores del Recu I TT y del Recu II, así como la existente entre los valores del Recu I y del Recu II en el ensayo del 30 minutos.

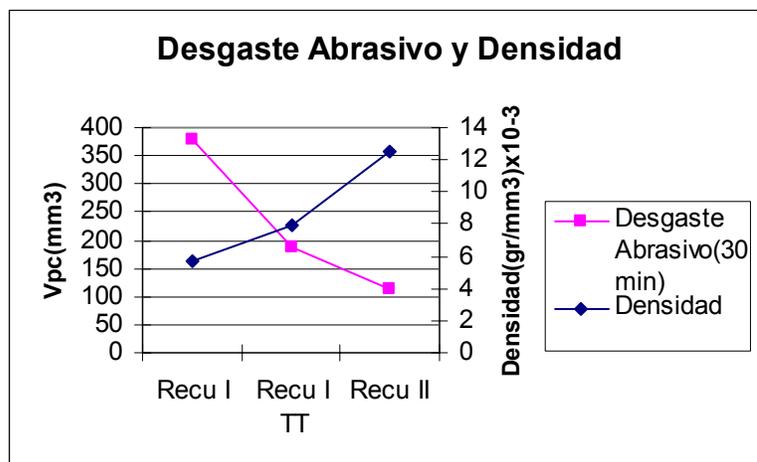


Figura N° 3.44. Comparación entre el desgaste abrasivo y densidad de los recubrimientos estudiados.

Si relacionamos los resultados obtenidos, en cuanto a la pérdida volumétrica, para el Acero con los de los demás materiales tenemos que éste pierde entre 1,08 y 1,71 veces más volumen que el Recu I, entre 1,60 y 3,48 veces más que el Recu I TT y entre 2,61 y 5,76 veces más que el Recu II. Las diferencias tienden a hacerse más notorias a medida que se incrementa la densidad de los recubrimientos.

Comparando ahora los resultados del Recu I con los del Recu I TT se puede ver que el Recu I pierde entre un 32 y un 51 % más volumen que el Recu I TT, pudiéramos considerar ésta como otra evidencia del beneficio otorgado por el tratamiento térmico posterior al recubrimiento aplicado.

Si se analizan los resultados pertinentes al Recu I TT con los del Recu II se tiene que el Recu I TT pierde entre un 39 y un 40 % más volumen que el Recu II.

3.7.- ANÁLISIS DE LA MEB REALIZADA SOBRE LAS SUPERFICIES ENSAYADAS

Por medio de la técnica de MEB se procedió a realizar un estudio de la superficie en las probetas ensayadas, tanto por erosión como por abrasión, obteniendo así una serie

de imágenes ilustrativas del daño originado por el abrasivo sobre los materiales ensayados. Véanse las Figuras N° 3.45 a la 3.50 en las cuales se muestran las superficies de las probetas, de los diversos recubrimientos, ensayadas por erosión, con ampliaciones de 50X y 500X, para un ángulo de 90° y un tiempo de ensayo de 9 min (condición de mayor desgaste).

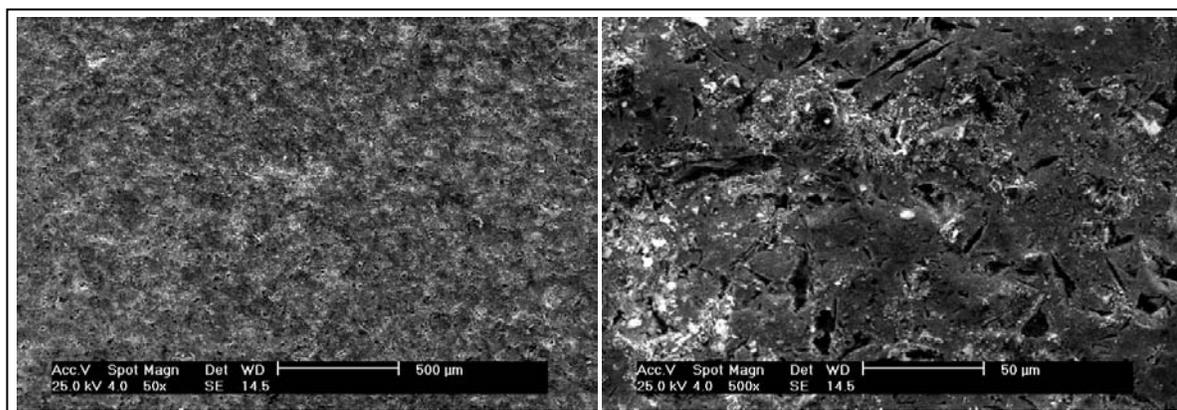


Figura N° 3.45. MEB de la superficie. Recu I, 9 min, 90°, 50x. Ensayo de erosión.

Figura N° 3.46. MEB de la superficie. Recu I, 9 min, 90°, 500x. Ensayo de erosión.

En la Figura N° 3.46 puede apreciarse el gran número de fracturas que muestran las fases duras (partes blancas), los aplastamientos por deformación plástica de las fases blandas (partes gris oscuro), los desprendimientos de material (sectores negros equiaxiales) y las grietas producto del desgaste originadas sobre la superficie. Según los resultados obtenidos este material (Recu I) fue el que sufrió la mayor pérdida de masa, hecho corroborado al observarse una superficie tan severamente afectada por el desgaste.

La Figura N° 3.48, muestra la superficie desgastada del Recu I TT. En ella se aprecia también las fracturas de las fases duras, las cuales se encuentran ahora mejor distribuidas producto del tratamiento térmico. En este caso son menos los desprendimientos de material ya que el fenómeno de aplastamiento de la fase blanda es menor dejando a las fases duras menos expuestas ante la acción erosiva. Existen,

igual que en el caso anterior, zonas de color gris oscuro que representan la deformación plástica de las fases blandas producto del impacto del erodante (Al_2O_3).

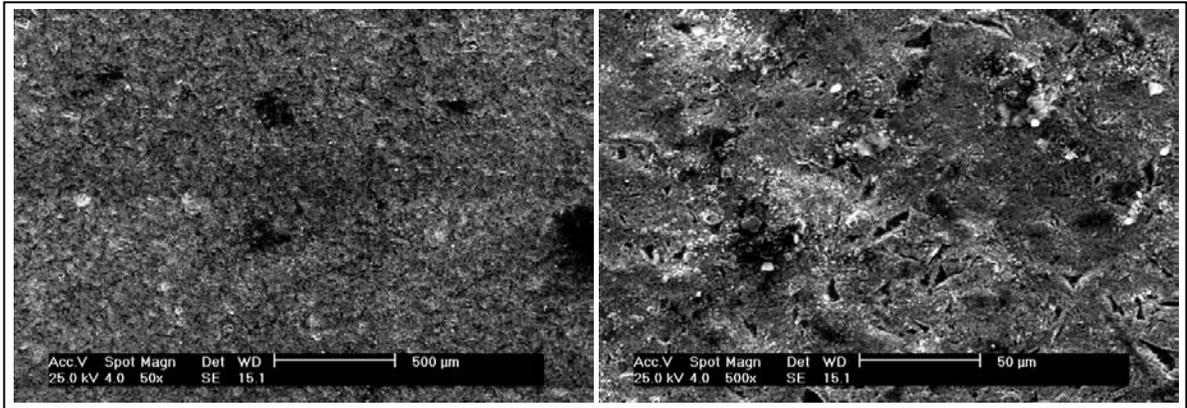


Figura N° 3.48. MEB de la superficie. Recu ITT, 9 min, 90°, 50x. Ensayo de erosión.

Figura N° 3.48. MEB de la superficie. Recu ITT, 9 min, 90°, 500x. Ensayo de erosión.

En la Figura N° 3.50 puede observarse la superficie desgastada por erosión del Recu II. En ella se aprecia claramente la fina dispersión de las fases duras, lo cual genera una mejor respuesta, es por ello que resulta completamente lógico el resultado obtenido en cuanto a la baja pérdida de masa en comparación con el Recu I y el Recu I TT. En la figura se observa una fase dura fracturada, distribuida de forma uniforme sobre la superficie, con algunos huecos producto del desprendimiento de material y mucha menos deformación plástica que en los casos anteriores.

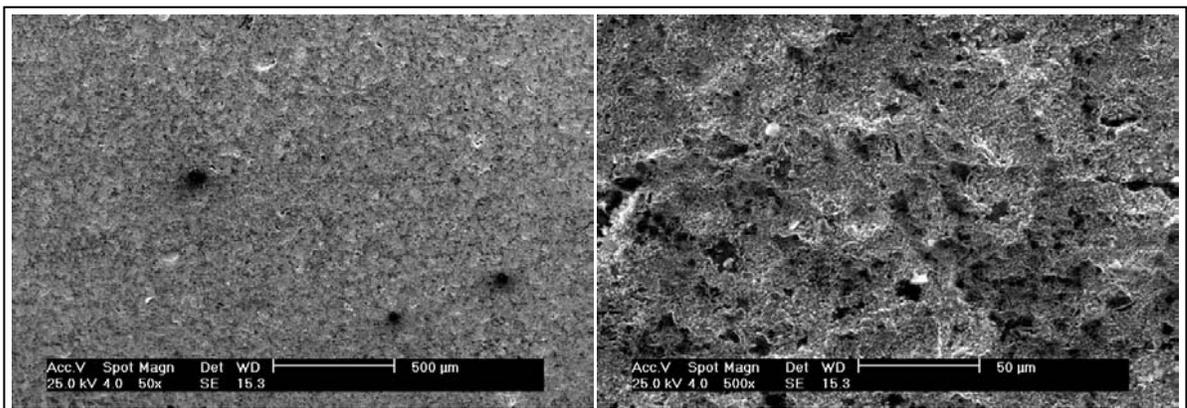


Figura N° 3.49. MEB de la superficie. Recu II, 9 min, 90°, 50x. Ensayo de erosión.

Figura N° 3.50. MEB de la superficie. Recu II, 9 min, 90°, 500x. Ensayo de erosión.

En términos generales puede decirse que el material menos compacto, es decir el Recu I, sufre un aplastamiento por deformación plástica mucho mayor que el Recu II el cual presenta una mayor densidad.

Pudiera decirse que el mecanismo de desgaste sufrido por el material consta de los siguientes pasos: una deformación plástica de las fases blandas, la cual conlleva a la exposición de las fases duras que conforman el recubrimiento y a una disminución en el área de anclaje de las mismas; la fractura y fragmentación de las fases duras, las cuales se encuentran ahora más sensibles al proceso erosivo; finalmente se origina el desprendimiento de las fases duras y de las fases blandas que han sido endurecidas por deformación, generando así cavidades en la superficie.

Véanse ahora las Figuras N° 3.51 a la 3.56 en las cuales se muestran las superficies de las probetas, de los diversos recubrimientos, ensayadas por abrasión, con ampliaciones de 50X y 500X, para un tiempo de ensayo de 30 min (condición de mayor desgaste).

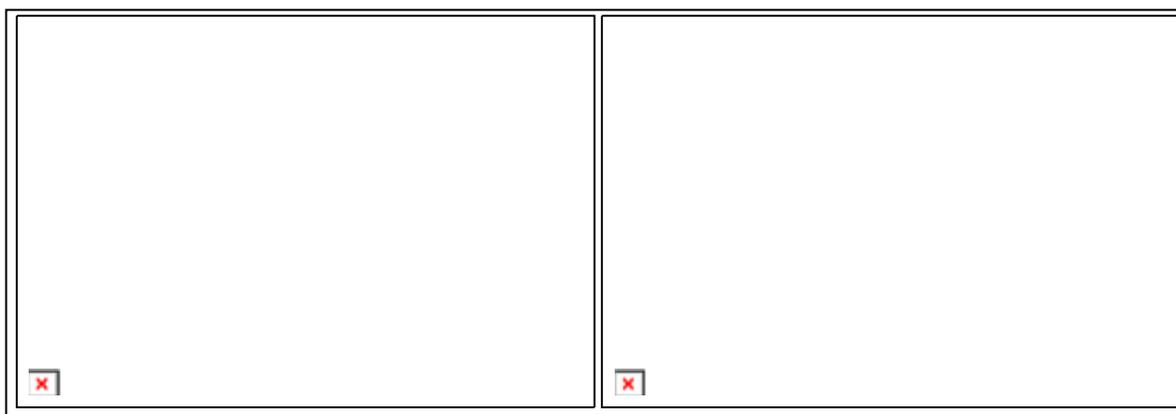


Figura N° 3.51. MEB de la superficie. Recu I, 30 min, 50x. Ensayo de abrasión.

Figura N° 3.52. MEB de la superficie. Recu I, 30 min, 500x. Ensayo de abrasión.

En la Figura N° 3.52 puede observarse el severo daño ocasionado a la superficie debido al proceso abrasivo, en este caso se presenta una deformación de las fases blandas (partes gris oscuro) con una cierta dirección preferencial acorde al sentido de

giro del disco del equipo de ensayo. Se presentan fases duras seriamente fracturadas en pequeños trozos, pero aglomeradas en porciones. También se observan los huecos dejados por el desprendimiento de material, algunas grietas y las huellas características del labrado plástico causado partículas duras (o endurecidas) que se desprenden y son arrastradas sobre la superficie.

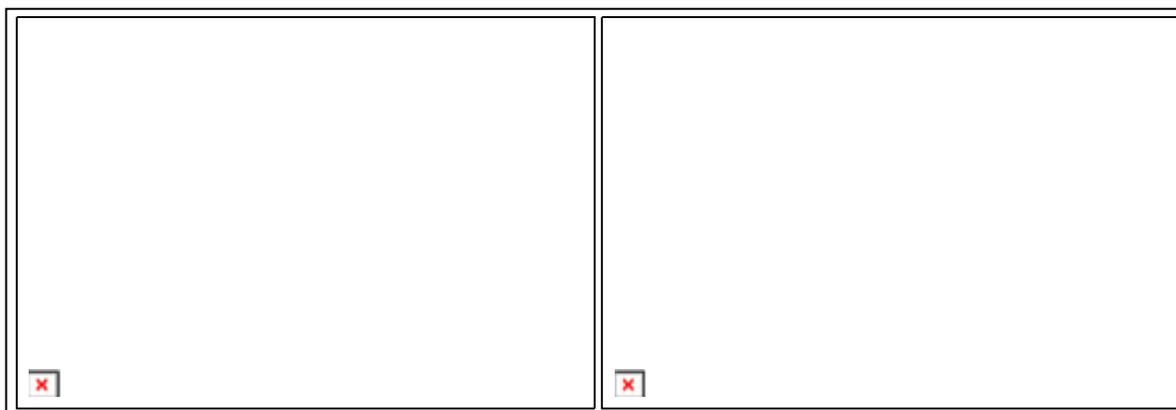


Figura N° 3.53. MEB de la superficie. Recu I TT, 30 min, 50x. Ensayo de abrasión.

Figura N° 3.54. MEB de la superficie. Recu I TT, 30 min, 500x. Ensayo de abrasión.

En la Figura N° 3.54 puede observarse la superficie desgastada por abrasión del Recu I TT, en ella se presenta una distribución algo más uniforme de las fases duras, si se compara con el Recu I, lo cual le proporciona una mayor resistencia. En este caso la deformación plástica y el desprendimiento de material es mucho menor que en el caso anterior, se presentan algunas huellas dejadas por el labrado plástico y pequeñas grietas.

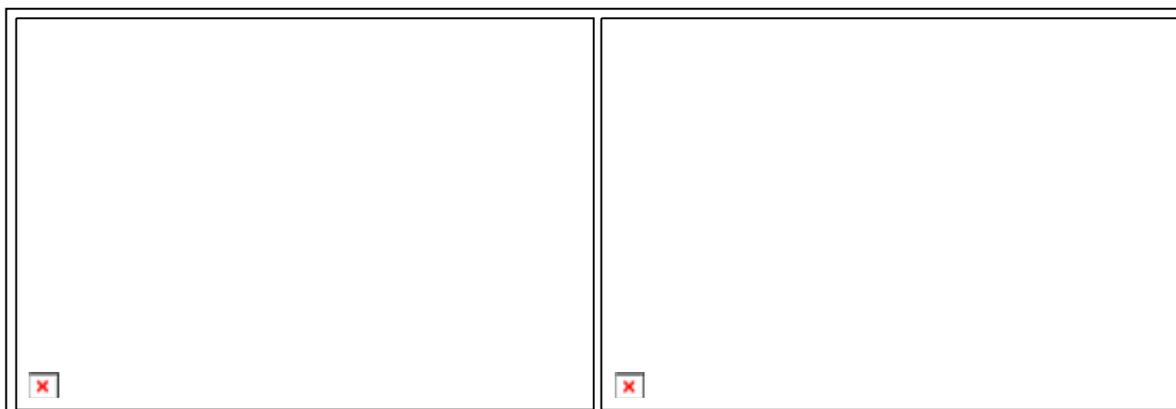


Figura N° 3.55 MEB de la superficie. Recu II, 30 min, 50x. Ensayo de abrasión.

Figura N° 3.56. MEB de la superficie. Recu II, 30 min, 500x. Ensayo de abrasión.

En la Figura N° 3.56 puede observarse el efecto del desgaste abrasivo sobre la superficie del Recu II. En ella la deformación plástica no es tan notable como en los casos anteriores, debe tenerse presente que este es el recubrimiento de mayor densidad y con mayor dispersión de las fases duras. En este caso existen algunos huecos dejados por los desprendimientos de material, pero en una cantidad mucho menor que la observada anteriormente. La superficie no muestra marcas de deformación plástica tan severas como las observadas en los casos del Recu I y el Recu I TT.

En general puede decirse que el ensayo abrasivo aplicado genera el siguiente mecanismo de desgaste: deformación plástica de las fases blandas, llegando inclusive a la fractura de algunas de ellas que han sido endurecidas por deformación; labrado plástico de la superficie originado por las partículas duras que se desprenden del material y son arrastradas (véanse los surcos que presentan en su extremo una partícula blanca).

Obsérvese que la severidad del daño causado a la superficie es inversamente proporcional a la densidad de los recubrimientos, es decir, a mayor densidad menor daño producto del desgaste. Pudiéramos decir entonces que la dispersión fina de las fases duras y la compactación del recubrimiento conforman un par de condiciones sumamente influyentes al momento de evaluar el desgaste.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

Se obtuvo que la rugosidad de la mezcla (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] es un 14% superior a la del (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] con tratamiento térmico posterior, con lo cual pudiéramos decir que la rugosidad de un recubrimiento puede ser mejorada mediante la aplicación de un tratamiento térmico posterior. Ya que éste permite una reestructuración de las fases que conforman el material y, a la vez, brinda la posibilidad de disminuir todas esas grietas y porosidades características de un recubrimiento aplicado vía HVOF, tal y como pudo apreciarse mediante la MEB efectuada a dichas muestras.

La dureza de los recubrimientos empleados fue mayor que la del Acero AISI 1020, más no por ésta condición puede aseverarse que el desgaste de éstos va a ser menor, ya que existen diversos factores que resultan sumamente influyentes al momento de evaluar el desgaste de un material. La aplicación del tratamiento térmico posterior permite aumentar la dureza del recubrimiento, esto pudo apreciarse al comparar el valor de dureza Vickers de la mezcla (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] con el de la (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] con tratamiento térmico posterior, ya que la dureza del recubrimiento se incrementó en un 50%.

A partir de los ensayos erosivos pudo apreciarse que los materiales más dúctiles, tal como el Acero AISI 1020, sufren mayores desgastes por erosión a medida que se disminuye el ángulo de ataque del material erosivo. En cambio, con los materiales frágiles, como lo son los recubrimientos estudiados, ocurre todo lo contrario, es decir, a medida que se incrementa el ángulo de ataque también lo hace el desgaste erosivo generado. Tal comportamiento puede corroborarse con la aplicación de los ensayos abrasivos, si se considera al ensayo abrasivo como un erosivo aplicado tangencialmente a la superficie bajo condiciones de carga muy peculiares. En función de los resultados obtenidos puede decirse que, para un ángulo de incidencia de 45° y

un tiempo de ensayo de 9 min., la tasa de erosión para la aleación (WC-10%Co)+4%Cr es 4 veces mayor que para el Acero, mientras que la de la mezcla (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] con tratamiento térmico posterior es 7,1 veces mayor y finalmente la de (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] es 9,8 veces mayor.

El desgaste erosivo no es proporcional al tiempo de aplicación, es decir, durante los primeros tres minutos de ensayo se genera un desgaste sumamente elevado si se compara con los 6 minutos restantes aplicados posteriormente. Esto nos pudiera indicar la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales producto del “trabajo en frío” otorgado por los primeros minutos de ensayo.

Durante la aplicación del desgaste abrasivo se pudo observar que la mayor pérdida volumétrica la sufrió el material más dúctil. Los materiales más frágiles, como los recubrimientos, presentaron comportamientos diversos, es decir, algunos se desgastaron más que otros, pero en general, todos resultaron ser más resistentes que el Acero AISI 1020. Puede decirse que si relacionamos el Acero con los de los demás materiales, tenemos que éste pierde hasta 1,71 veces más volumen que el recubrimiento (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®], 3,48 más que el (WC-12%Co)+80%Colmonoy88[®] con tratamiento térmico posterior y 5,76 veces más que el (WC-10%Co)+4%Cr.

Por medio de la MEB aplicada a las superficies desgastadas pudiera decirse que, para el desgaste erosivo, el mecanismo de desgaste consistió en un aplastamiento de las fases blandas, lo cual permitió la exposición de las fases duras haciéndolas más sensibles al proceso erosivo y permitiendo así su remoción. En cambio, para el proceso de desgaste abrasivo, el mecanismo de desgaste sugerido por las imágenes consiste básicamente en un arado plástico ocasionado por partículas duras o endurecidas por deformación que se desprenden del material, siendo posteriormente arrastradas sobre la superficie.

En función de los resultados obtenidos pudiéramos decir que existe una íntima relación entre la dispersión fina de las fases duras y el desgaste sufrido, ya que a medida que aumenta la dispersión se disminuye la cantidad de material removido.

4.2.- RECOMENDACIONES

El valor de la rugosidad debe de hallarse mediante un estudio tipo barrido, tal y como se hizo en el caso de la microdureza, a fin de otorgar un valor promedio que resulte lo suficientemente significativo como para la elaboración de un trabajo de éste tipo.

El estudio de MEB realizado sobre la superficie de las probetas ensayadas, debería de efectuarse también sobre las superficies antes de ensayar, para tener así una imagen antes y otra después de los ensayos y poder realizar un estudio comparativo entre las condiciones de ambas superficies.

Efectuar una adecuada calibración de los equipos de alta precisión, tal como la balanza electrónica, ya que de estos equipos depende la calidad de los resultados obtenidos, así como la reproducibilidad de los mismos.

Las arenas empleadas para los ensayos no deben de reciclarse más de 3 veces, así se garantiza la uniformidad en cuanto a su forma y granulometría. No debe someterse a procesos de molienda, puesto que generalmente dichos procesos otorgan como resultado granos con filos agudos que distorsionarían los resultados.

Resultaría conveniente la ejecución de más ensayos erosivos para diversos tiempos y ángulos sobre un mismo material, a fin de poder evaluar de forma precisa la variación de la tasa de desgaste en función de dichas variables.

Es importante notificar a próximos usuarios sobre las posibles consecuencias a la salud que acarrea la mala manipulación de la arena de cuarzo.

Renovar los sellos de la máquina de erosión para disminuir las pérdidas de material erodante y proteger así la salud de los operadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bangueses, Ana María y Rodríguez, José; (2000). “Influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia a la erosión de un recubrimiento de aleación autofundente obtenidos por HVOF”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Berger L. M.; W. Hermel; P. Vuoristo; T. Mäntylä; W. Lengauer; P. Ettmayer; (1996). “Structure, Properties and Potentials of WC-CO, Cr₃C₂-NiCr and TiC-Ni-Based Hardmetal-like Coatings”. *Thermal Spray*. Vol. 13. Págs. 89-96.
- Ferrara, Salvador y Pérez, Rafael; (2001). “Evaluación de la resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado por rociado térmico”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- García, Euro y Redden, Emmett; (1998). “Influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia a la erosión de un acero 1020 termo rociado con la aleación base Níquel por la técnica HVOF”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Guilemany, J. M.; Miguel, J. M.; Vizcaino, S.; Climent, F.; (2001). “Role of three-body abrasion wear in the sliding wear behavior of WC-Co coatings obtained by thermal spraying”. *Surface & Coatings Technology*. Vol. 14
- Klissan, Jorge y Bavaresco, Luis; (2000). “Estudio de la influencia al desgaste de recubrimientos rociados mediante la técnica HVOF”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Kosel, Thomas; (1992). “Solid Particle Erosion”. *ASM Handbook Friction, Lubrication and wear Technology*. Vol. 18. USA.

- Lathabai S.; M. Otmüller; I. Fernandez; (1998) “Solid particle erosion behavior of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings”. *Wear*. N° 221. Págs. 93-108.
- Malaver V., Ignio R. y La Barbera S., Luis J.; (1995). “Evaluación de la resistencia al desgaste por erosión de recubrimientos termo-rociados”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Pinto, Nicola y Rangel, Aldrin; (1999). “Diseño, construcción y puesta a punto de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65”. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Rabinowicz Ernest. (1992). “Friction and wear of materials”. Ed. John Wiley and Sons. New York. Págs. 170-180.
- Tucker Jr., Robert. (1992). “Thermal Spray Coatings”. *ASM Handbook Surface Engineering*. Vol. 5. USA.
- Tylczak Joseph H.; (1992). “Abrasive Wear”. *ASM Handbook Solid Particle Erosion*. Vol. 18. USA.
- Wang B. Q.; (1995). “The elevated Temperature Erosion Behavior of HVOF Tungsten Carbide Cermet Coatings”. *Thermal Spray*. Vol. 5 Págs. 711-715.
- ASTM Designation: G76-95. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jet.
- ASTM Designation: G65C. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel.
- ASTM Designation: 92. Standard Test Method for Vickers hardness of metallic materials.

ANEXOS

NOTA IMPORTANTE:

Como anexos fueron entregadas las Normas de la ASTM G65C y G76, las cuales pueden adquirirse en cualquier banco de datos técnicos.