



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**Erosión por cavitación con ceniza volcánica
en recubrimientos de pinturas automotrices**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

PRESENTA:

José Antonio Oropeza Piñán

ASESOR:

Dr. Marco Antonio Cruz Gómez



Oficio No.S.AC. 3812/14
ACEPTACIÓN TEMA TESIS

C. JOSÉ ANTONIO OROPEZA PIÑÁN
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DE LA B.U.A.P.
PRESENTE.

En atención a la autorización del Tema de Tesis que puso Usted a consideración de esta Facultad, se turnó la misma al :

M. en C. VICTOR GALINDO LÓPEZ
COORDINADOR DEL COLEGIO DE
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Habiendo autorizado el tema denominado:

“EROSIÓN POR CAVITACIÓN CON CENIZA VOLCÁNICA EN RECUBRIMIENTOS DE PINTURAS AUTOMOTRICES”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de esta tesis al **DR. MARCO ANTONIO CRUZ GOMEZ.**

Sin otro particular de momento, me es grato quedar de usted.

ATENTAMENTE

“PENSAR BIEN PARA VIVIR MEJOR”

H. Puebla de Z., 5 de noviembre de 2014

M.I. EDGAR IRAMILLAGRAN ARROYO
DIRECTOR



C.c.p.- Mesa de Exámenes Profesionales

Asesor

Archivo

M'EIVA/M'AEPS*rba

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

**ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN**

**M.I. EDGAR IRAM VILLAGRAN ARROYO
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA B.U.A.P.
Presente.**

El suscrito: **DR. MARCO ANTONIO CRUZ GÓMEZ**, Asesor del Tema de Tesis denominado:

**“EROSIÓN POR CAVITACIÓN CON CENIZA VOLCÁNICA EN RECUBRIMIENTOS
DE PINTURAS AUTOMOTRICES”**

Presentado por el **C. JOSÉ ANTONIO OROPEZA PIÑÁN**, Pasante de la Carrera de **INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en **autorizar la impresión** de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

H. Puebla de Z., 24 de noviembre de 2014



**DR. MARCO ANTONIO CRUZ GÓMEZ
ASESOR**

C.c.p.- Interesado
Archivo
rba



Carta de Cesión de Derechos.

En la ciudad de Puebla, Pue, México, el día 03 de diciembre de 2014, el que suscribe C. José Antonio Oropeza Piñán, pasante de la carrera de Ingeniería Mecánica y Eléctrica con matrícula 980019950 del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería; de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, manifiesta que es autor intelectual y material del siguiente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Marco Antonio Cruz Gómez, quienes ceden los derechos de esta investigación titulada: *“Erosión por cavitación con ceniza volcánica en recubrimientos de pinturas automotrices” a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, para su difusión con fines académicos y de investigación.*

Los usuarios que utilicen la información de esta investigación están obligados a no reproducir el contenido de esta sin la autorización previa del autor, esta puede ser obtenida escribiendo a la dirección electrónica joanop78@hotmail.com y mangacruz@live.com. Si el permiso es otorgado se deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar como fuente de la misma.

José Antonio Oropeza Piñán



AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios por permitirme llegar hasta la culminación de este proyecto.
- ❖ A mis padres ya que me han dado un apoyo incondicional e invaluable desde que me trajeron a la vida.
- ❖ A mi país México por darme por tierra este país de oportunidades.
- ❖ A la Benemérita universidad Autónoma de Puebla mi Alma Mater.
- ❖ A mi asesor el Dr. Marco Antonio Cruz Gómez del cual me precio de contar entre mis amistades, por guiarme en esta etapa.
- ❖ A la srta. Irene Ramírez Trejo quien ahora forma parte sustancial en mi proyecto de vida, quien me ha dado su confianza, paciencia y tolerancia.
- ❖ Al selecto grupo de Tribología de la facultad de Ingeniería de la BUAP.
- ❖ A todas las personas que directa e indirectamente permitieron que las circunstancias me fuesen favorables en la realización de este trabajo.

Índice.	Pág.
Carta de cesión de derechos.	I
Agradecimientos.	II
Índice de figuras.	VIII
Índice de tablas.	X
Índice de ecuaciones.	XI
Glosario.	XI
Abreviaturas.	XI
Resumen.	XII
Abstract.	XII
Introducción.	XIII
Antecedentes.	XV
Hipótesis.	XVI
Justificación.	XVI
Planteamiento del problema.	XVI
Objetivos.	
Objetivo general.	XVII
Objetivo específico.	XVII

Capítulo I.

1. Ceniza volcánica.	1
1.1. Introducción.	
1.1.1. Terminología sobre agregados de ceniza volcánica.	1
1.1.2. Partículas expulsadas de un volcán durante una erupción.	4
1.1.3. Segregaciones de partículas volcánicas denominadas <i>fall out</i> .	4
1.1.4. Hipótesis del origen de la <i>lapilli accretionary</i> .	4
1.1.5. Observaciones geológicas.	5
1.1.6. Mecanismos de Contacto.	5
1.1.7. Medio líquido.	6
1.1.8. Mecanismos de unión.	6
1.1.8.1. Tensión superficial (fuerzas capilares)	7
1.1.8.2. Fuerzas electrostáticas.	7
1.1.8.3. Fuerzas de <i>Van der Waals</i> .	7
1.1.8.4. Enclavamiento mecánico.	7

	Pág.
1.1.9. Composición química de la ceniza volcánica.	8
1.1.10. Propiedades físicas.	9
1.2. Usos de la ceniza volcánica.	9

Capítulo II

2. Tribología.	10
2.1. Definición y campo de estudio de la Tribología.	10
2.1.1. Fricción.	11
2.1.2. Desgaste.	11
2.1.3. Lubricación.	12
2.1.3.1. Regímenes de lubricación.	12
2.1.3.1.1. De película de fluido.	12
2.1.3.1.2. Elastohidrodinámica.	13
2.1.3.1.3. Límite (también llamada lubricación de película límite).	13
2.2. Clasificación del desgaste.	13
2.2.1. Adhesivo.	13
2.2.2. Abrasivo.	14
2.2.2.1. Abrasivo dos cuerpos.	15
2.2.2.2. Abrasivo a tres cuerpos.	15
2.2.3. Corrosivo y clasificación de la corrosión.	15
2.2.3.1. General o uniforme.	15
2.2.3.1.1. Atmosférica.	15
2.2.3.1.2. Galvánica.	16
2.2.3.1.3. Metales Líquidos.	17
2.2.3.1.4. Altas Temperaturas.	17
2.2.3.2. Localizada.	17
2.2.3.2.1. Fisuras o “ <i>Crevice</i> ”	17
2.2.3.2.2. Picadura o “ <i>Pitting</i> ”.	17
2.2.4. Fatiga superficial.	18

2.2.5. Erosión.	19
2.2.5.1. Impacto o cavitación por partícula sólida.	19

Capítulo III

3. Tipos de recubrimientos automotrices para carrocerías y procesos de aplicación.	20
3.1. Expectativas para los acabados de pintura automotriz.	20
3.2. Nombre y funciones de las capas de recubrimientos de pintura automotriz.	20
3.3. Tipos de recubrimientos de las pinturas base y transparente automotrices: Esmalte y acrílico.	21
3.3.1. Esmaltes.	21
3.3.2. Acrílicos.	22
3.4. Proceso de aplicación de capas de pintura que componen el recubrimiento de la carrocería de un auto.	23
3.4.1. Primera fase.	23
3.4.1.1. Tratamiento de Fosfatación Tricacionica Microcristalina.	24
3.4.1.2. Cataforesis o electrodeposición catódica.	25
3.4.1.3. Aplicación de la <i>Antichip</i> .	27
3.4.1.4. Aplicación del <i>Primer</i> .	27
3.4.2. Segunda fase.	28
3.4.2.1. Acabado monocapa.	29
3.4.2.2. Acabado bicapa.	29
3.5. Escenarios tribológicos.	29
3.5.1. Desgaste por impacto de rocas de dimensiones menores.	30

Capítulo IV

	Pág.
4. Caracterización de superficies.	31
4.1. Introducción a la perfilometría.	31
4.1.1. Texturas.	31
4.1.1.1. Rugosidad.	31
4.1.1.2. Ondulación.	31
4.1.1.3. Orientación.	31
4.1.1.4. Fallas.	31
4.1.2 Escalas de medición.	32
4.1.2.1. Escala $\mu m Rz$ = profundidad de rugosidad media.	32
4.1.2.2. Escala $\mu m Ra$ = El parámetro de rugosidad Ra (Rugosidad media aritmética).	33
4.2. Sistemas para evaluar el estado superficial.	35
4.2.1. Rugosímetros.	35
4.3. Microscopia electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	35
4.3.1. Método de funcionamiento de un <i>SEM</i> .	36
4.3.1.1. Electrones retrodispersados (e_1).	36
4.3.1.2. Electrones secundarios (e_2).	36
4.3.1.3. Radiación electromagnética (<i>X ray</i>) y otras partículas menos significativas.	36
4.4. Termografía.	37
4.4.1. Sistemas portátiles de medición de imágenes térmicas.	37
4.4.2. Transferencia de calor.	38
4.4.2.1. Radiación.	38
4.4.2.2. Conducción.	38
4.4.2.3. Convección.	38
4.4.3. Criterios sobre la termografía.	39
4.5. Métodos de obtención del valor de dureza de un material.	40
4.5.1. Indentación.	40
4.5.2. Nanoindentación.	40

	Pág.
4.5.2.1. Indentador <i>Berkovich</i> .	40
4.6. Definición de la elipse.	42
4.6.1. Ecuación canónica de la elipse.	42
4.6.2. Ecuación de la elipse con centro fuera del origen de coordenadas.	43
4.6.3. Ecuación general de la elipse.	45
4.7. El cono truncado o tronco de cono.	45
4.7.1. Ecuación del cono truncado.	46
Capítulo V	
5. Experimentación.	
5.1. Especímenes.	48
5.2. Aparato de prueba.	48
5.3. Condiciones de prueba.	50
5.4. Procedimiento de prueba.	51
5.4.1. Métodos de prueba con ceniza volcánica.	51
5.4.2. Métodos de prueba con arena sílica.	52
5.5. Resultado de las pruebas.	53
Discusión de resultados.	60
Conclusiones.	62
Referencias.	62
Anexos.	68

Índice de figuras.

Núm. Fig.	Descripción.	Pág.
Fig. 1	Volcán Popocatépetl y columna de ceniza.	1
Fig. 2	Agregados que han descrito al “ <i>lapilli accretionary</i> ” en los últimos 20 años.	2
Fig. 3	Tamaño y agregados de ceniza considerados tipo <i>plume</i> .	2
Fig. 4	Tipos de agregados de ceniza volcánica según su morfología provenientes: AP1(a) de la erupción del volcán Eyjafjallajokull 2010. Islandia, AP2 (b) de los depósitos superiores de escoria, Santorini y AP3 del volcán Eyjafjallajokull.	2
Fig. 5	Tipos de agregados de ceniza volcánica según su mecanismo de formación PC1 (A) y PC2 (B), volcán <i>Eyjafjallajokull</i> 2010, Islandia.	3
Fig. 6	Modelo de dispersión de ceniza 14 de mayo de 2014 8:00hrs. (t/km^2) basado en <i>Fall 3D- 6.2</i> .	6
Fig. 7	Micrografía de un cristal vesicular, fragmento de un cristal de ceniza de 01mm, expulsado el 18 de mayo de 1980 del monte <i>St. Helens</i> .	8
Fig. 8	Tribosistema.	10
Fig. 9	Curva de regímenes de lubricación.	12
Fig. 10	Desgaste adhesivo.	14
Fig. 11	Acción abrasiva de partículas sobre material base.	14
Fig. 12	Corrosión y oxidación.	16
Fig. 13	Desgaste por fatiga superficial.	18
Fig. 14	Mecanismos de remoción de material que actúan durante desgaste erosivo cuando una partícula sólida colisiona una superficie plana.	19
Fig. 15	Cavitación por partícula solida semiesférica y angular.	19
Fig. 16	Grososres de las capas de recubrimiento de una pintura automotriz.	21
Fig. 17	Reacciones del grupo Isocianato.	23
Fig. 18	Pre tratamientos de pintura aplicados a carrocerías automotrices.	24
Fig. 19	Aplicación de fosfatación tricationica microcristalina.	25
Fig. 20	Esquema de una cuba de electrodeposición.	26
Fig. 21	Aplicación de masillas de sellado.	26
Fig. 22	Aplicación de la capa de <i>PVC (capa antichip)</i> .	27
Fig. 23	Marco electrostático utilizado para eliminar polvo.	28

Num fig.	Descripción.	Pág.
Fig. 24	Aplicación de la pintura base.	28
Fig. 25	Horno para pintura automotriz.	29
Fig. 26	Remoción de pintura por picadura de partículas solidas.	27
Fig. 27	Delaminación sin remoción en el límite metal/polímero.	28
Fig. 28	Esquema empleado en la medición de rugosidad	32
Fig. 29	Representación grafica del cálculo del Ra .	33
Fig. 30	Perfil de rugosidad centrado en la línea central.	33
Fig. 31	Representación del área entre el perfil y línea central (m) en un tramo de longitud $a_z/2$.	34
Fig. 32	Representación del área entre el perfil y línea central (m) en un tramo de longitud $a_z/2$ en valor absoluto.	34
Fig. 33	Equipo para medir rugosidad: a) Rugosímetro, b) palpador del rugosímetro.	35
Fig. 34	Señales generadas por un haz de electrones en un microscopio electrónico de barrido.	36
Fig. 35	Esquema de funcionamiento de una cámara termográfica.	37
Fig. 36	Escalas de temperatura.	39
Fig. 37	Equipo para medir dureza de superficies; a) Diagrama del sistema utilizado en un nanoindentador; La fuerza aplicada en el indentador se genera a través de una bobina que se encuentra dentro de un imán circular. El sistema de desplazamiento de detección consiste en un capacitor de tres placas (discos circulares). b) Indentador <i>Berkovich</i> : una pirámide con un triángulo equilátero como área de la base.	41
Fig. 38	Nanoindentación método <i>Berkovich</i> ; a) Imagen de la punta superior de un indentador triangular <i>Berkovich</i> y b) huella residual en una muestra sometida a una indentación <i>Berkovich</i> .	
Fig. 39	Definición grafica de la elipse.	42
Fig. 40	Elipse con centro fuera del eje de coordenadas geoméricamente.	43
Fig. 41	Representación gráfica de la solución.	44
Fig. 42	Área y elementos de un cono truncado.	46
Fig. 43	Ilustración de las películas de recubrimientos de la pintura automotriz.	47
Fig. 44	Boquilla de flujo de aire mezclado con ceniza volcánica realizando una prueba.	48
Fig. 45	Cámara de alta velocidad para obtener fotografías de las pruebas.	48
Fig. 46	Probador para el blasteo con ceniza volcánica y arena sílica; Boquilla de blasteo.	48
Fig. 47	Boquilla para realizar ataque con ceniza volcánica y arena sílica.	50

Num fig.	Descripción.	Pág.
Fig. 48	Huellas de desgaste de una muestra atacada con arena sílica a diferentes ángulos de ataque; a) 90°, b) 80°, c) 70°, d) 60°, e) 50° f) 45°, g)40°, h) 30°, i) 20°, j)10°.	52
Fig. 49	Ceniza volcánica; a) Micrografía, b) Análisis generalizado de EDS.	52
Fig. 50	Partículas de ceniza volcánica $\leq 100\mu\text{m}$; a) Expulsión, b) Trayectoria, c) Blasteo con ceniza volcánica.	53
Fig. 51	Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 90 y b) 80°.	53
Fig. 52	Desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 70 y b) 60°.	54
Fig. 53	Desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 50 y b) 45°.	54
Fig. 54	Desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 40 y b) 30°.	55
Fig. 55	Desgaste debido a erosión por cavitación de espécimen recubierto con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulo de ataque de 20°.	55
Fig. 56	Huella de desgaste debido a erosión por cavitación de espécimen recubierto con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulo de ataque de 10°.	56
Fig. 57	Corrosión en la huella de desgaste; a) al inicio y b) corrosión actuando en la mayor parte de la superficie de la huella y en el recubrimiento.	56
Fig. 58	Diámetros promedio de las huellas de desgaste por cavitación de las capas de pintura automotriz; a) <i>clear coat</i> , b) <i>base coat</i> , c) <i>primer</i> , d) <i>antichip</i> , e) <i>e coat</i> , f) sustrato de acero, g) Daño al sustrato.	57
Fig. 59	Imagen tomada con la cámara termografica <i>Flirt</i> .	58
Fig. 60	Perfilometria de la huella de desgaste con un ángulo de ataque de 90°.	58
Fig. 61	Perfilometria de la huella de desgaste con un ángulo de ataque de 10°.	59

Índice de tablas.

Tabla núm.	Descripción.	Pág.
Tabla 1	Composición química en % según <i>software WDS data</i> .	8
Tabla 2	Compuestos químicos que componen la ceniza volcánica.	9
Tabla 3	Parámetros de prueba.	49

Índice de ecuaciones.

Ecuación.	Descripción.	
Ecuación 1	Parámetro Ra.	33
Ecuación 2	Parámetro Ra acotado.	34
Ecuación 3	Teorema de Pitágoras.	42
Ecuación 4	Ecuación de la elipse con centro fuera del origen.	43
Ecuación 5	Ecuación general de la elipse.	44
Ecuación 6	Ecuación general de la elipse desarrollada.	45
Ecuación 7	Ecuación general de la elipse.	46
Ecuación 8	Área lateral de un cono truncado.	46
Ecuación 9	Área de un cono truncado.	46
Ecuación 10	Volumen de un cono truncado.	46

Glosario.

Término.	Definición.
Piroclastos.	Cualquier fragmento sólido expulsado durante una erupción volcánica.
Agregación.	Cuando sucede la incorporación de material a un fragmento que funciona como núcleo.
Descendentes.	Son las partículas que resultan de una columna eruptiva cuando caen por inercia, individuales o agrupados.
Tephra.	Piroclastos.
Redox.	Reacción donde hay dos reactivos; uno cede y otro recibe electrones.
Neovolcánico.	Se refiere a la cadena montañosa que permite que nazcan volcanes.

Abreviaturas.

Símbolo.	Designación.	Unidades.
°N	Grados latitud norte.	°
°W	Grados longitud oeste.	°
°C	Grados centígrados.	°C
AP1	Pelet estructurado pobremente.	----
AP2	Pelet con estructura concéntrica.	----
AP3	Lluvia de barro.	----
PC1	Cúmulos de ceniza.	----
PC2	Partículas recubiertas.	----
Al	Aluminio.	----
Be	Berilio.	----
Zn	Zinc.	----
Fe	Fierro.	----
F	Flúor.	----
Mn	Manganeso.	----
P	Fosforo.	----
Ba	Bario.	----
Sr	Estroncio.	----
Li	Litio.	----
Ti	Titanio.	----
Rb	Rubidio.	----
Cu	Cobre.	----
Ni	Níquel.	----
Sb	Antimonio.	----
Pb	Plomo.	----
At	Ástato.	----
Cr	Cromo.	----
SEM	Microscopia electrónica de barrido.	----
Ra	Parámetro de rugosidad.	----
μm	Micrómetro.	----
MIC	Corrosión microbiológica.	----
Pvc	Poli cloruro de vinilo.	----
Uv	Ultravioleta.	----
Vcd	Voltaje en corriente directa.	Voltios.
MAR	Resistencia a la microabrasion.	Gramos.
IR	Infrarrojos.	----
°K	Grados Kelvin.	----
R	Grados Rankine.	----
RE	Reamur.	----
URSS	Unión de republicas Socialistas Soviéticas.	----
Rz	Parámetro de rugosidad.	----
m	Línea central.	----

Símbolos matemáticos.

t/km^2	Toneladas sobre kilometro cuadrado.
kg / m^3	Kilogramo sobre metro cubico.
mN	MicroNewton.
A_z	Área entre el perfil y línea central de un tramo, en valor absoluto.
m	Línea central.
ε	Coefficiente de emisividad.
F1	Punto fijo 1.
F2	Punto fijo 2.
V1	Extremo 1 de un vértice.
V2	Extremo 2 de un vértice.
B1	Extremo 1 de la mediatriz.
B2	Extremo 2 de la mediatriz.
D1	Distancia 1 en un triangulo.
D2	Distancia 2 en un triangulo.
b	Hipotenusa.
a	Cateto opuesto.
c	Cateto Adyacente.
C	Centro en un punto.
h	Altura.
k	Punto k en el plano.
F	Foco.
h	Altura.
x_0	Origen de coordenadas en eje de las abcisas.
y_0	Origen de coordenadas en eje de las ordenadas.
r	Radio menor.
R	Radio mayor.
g	Generatriz.
V	Volumen.
mPa	MicroPascales.
kPa	KiloPascales.
mm^2	Milímetros cuadrados.
m/s	Metros sobre segundo.
ml	Mililitros.
Gr	Gramos.
gr/min	Gramos por minuto.
S	Segundos.
GPa	GigaPascales.
keV	Kilo electro volt.
mm^3	Milímetros cúbicos.

Resumen.

Esta investigación tiene como objetivo el modelado de la resistencia de las múltiples capas de pinturas aplicadas a carrocerías automotrices nuevas; Las superficies de los recubrimientos fueron impactadas con partículas sólidas de ceniza volcánica, generando desgaste erosivo y cavitación, reduciendo la estética y provocando corrosión. Las partículas de ceniza volcánica tipo plume fueron recolectadas sobre autos de la zona urbana en la Ciudad de Puebla, las exhalaciones fueron provenientes del Volcán Popocatepetl, ubicado en las coordenadas geográficas 19.02° Norte y 98.62° Oeste en la Cordillera Neo volcánica en México.

El equipo de microerosión utilizó aire comprimido para el lanzamiento de partículas y arena sílica y de ceniza volcánica tipo plume con diámetros $\leq 100 \mu\text{m}$, a velocidades de $27.5 \pm 0.5 \text{ m/s}$, con diferentes ángulos de incidencia entre 10° y 90° , tasa de flujo abrasivo de 2 gr/min , durante 600 segundos. Los especímenes de área cuadrada de 50 mm por lado y 0.975 mm de espesor fueron impactados a 10 mm de separación de los recubrimientos utilizando una boquilla de blasteo con diámetro interior de 1 mm .

Técnicas de microscopía electrónica de barrido (*SEM*) y de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (*EDS*) y nanoindentación fueron utilizadas para evaluar: La composición química de la ceniza volcánica, el grosor de las multicapas de pintura, las rugosidades, los tamaños de las huellas y las nanodurezas en las diferentes películas delgadas que forman los recubrimientos de pinturas. Para medir la velocidad de propagación al impacto de las partículas fue utilizada una cámara de alta velocidad y con una cámara termográfica fueron medidas las variaciones de temperatura al momento del impacto en las cavidades.

La profundidad de las cavidades varió en función del ángulo de ataque. Las huellas de desgaste provenientes de pruebas con ceniza volcánica tuvieron daños semejantes a las hechas con arena sílica. Las partículas de ceniza volcánica fueron impactadas sobre la superficie, reduciendo los bordes de las vesículas, tendiendo a formar partículas esféricas que disminuyeron el ataque y el desgaste erosivo hasta en un 30%.

Palabras clave: Erosión, cavitación, recubrimientos de pintura, ceniza volcánica.

Abstract.

This research aims at modelling the resistance of multiple layers of new paints applied to automotive body. The surface of the coatings were impacted with solid particles of volcanic ash, generating erosive wear and cavitation, reducing the aesthetics and causing corrosion. The particles of volcanic ash plume type were collected on cars of the urban area in the City of Puebla. The exhalations were from Popocatepetl Volcano, located at the geographical coordinates 19.02° North and 98.62° West in the Cordillera Neovolcánica in Mexico.

The micro-erosion tester uses compressed air to launch as projectile particles of volcanic ash plume type with diameters $\leq 100 \mu\text{m}$, speeds $27.5 \pm 0.5 \text{ m/s}$, to different angles of incidence between 0° and 90° , abrasive flow rate of 2 g/min , during 600 seconds were impacted the specimens of square area of 50 mm per side and 0.975 mm thickness. The blaster nozzle with internal pipe diameter of 10 mm was positioned to 10 mm separation of the paint coating.

Were evaluated with techniques of Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectrometry X-ray (EDS): The chemical composition of the volcanic ash, the thickness of the multi - layer paint, it were determined the roughness and the sizes of the wear scars, the nano hardness were measured in the different thin film that form paint coatings. The high - speed camera was used to measure the speed and spread the impact of the particles and with a thermo graphic camera were measured temperature variations to the impact in the cavities.

The depth of the cavities was varied a function of angle of attack and were compared when the wear scars with silica sand test determined that the effect was similar. The particles of volcanic ash were impacted on the surface reducing edge of the vesicles tending to form spherical particles decreasing attack and erosive wear up to 30%.

Keywords: Erosion, cavitation, paint coatings, volcanic ash.

Antecedentes históricos.

Las nubes de erupción volcánica que contenían más del 50% de masa eruptiva formada por partículas de ceniza fina con diferentes granulometrías [1, 2, 3]. Estas fueron expulsadas a la troposfera permaneciendo ahí por varios meses [4]. La caída y el tamaño de las partículas de ceniza dependió de parámetros como: La fuente de erupción (distribución, dirección, fuerzas, turbulencia, masa, temperatura, formas de agregación, altura de columna y plume), ambientales (velocidad del viento, humedad, fuerzas electrostáticas y presión atmosférica) y geográficos (cercanía con el cráter) [1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Cuando el tamaño de la ceniza volcánica tuvo diámetros menores a 103 μm y densidades bajas alcanzó velocidades de caída entre 10 a 100 km/hr [12]. Si las partículas fueron mayores a 125 μm estas alcanzaron la atmósfera y al sedimentado incrementaron su velocidad por arriba de los 100 km/hr [13, 14].

Modelos numéricos que pronosticaron el sedimentado de ceniza volcánica plume fueron validados [15, 16, 17, 18]. Los agregados que cayeron de las nubes de ceniza volcánica cambiaron su morfología respecto a la distancia con el volcán y las condiciones ambientales [13, 19, 20]. La ceniza plume fue clasificada como la que cayó en un radio menor a 15 Km [21].

Un modelado analizó la porosidad sobre las superficies de las partículas de ceniza volcánica identificando cráteres y vesículas (cavidades formadas por burbujas de gas que escapó cuando la columna enfrió y cristalizó). La ceniza volcánica fue medida por dispersión de luz y calculada por aproximación discreta-dipolo, determinando que la porosidad fue directamente proporcional a la polarización. Esta fue clasificada por la forma de las vesículas en tres modelos: grande, pequeña y una versión compacta de la grande [6].

La ceniza volcánica fue modelada en función de su tamaño, textura, forma y vesículas [22, 23, 24, 25, 26, 27]. Los agregados de ceniza volcánica no estructurados < 2 mm fueron denominados lapilli [3, 5, 6, 13, 24, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. Estos fueron también llamadas pellets de acreción -*accretionary pellets*- y subdivididas en: pellets pobremente estructurados -*poorly structured pellets*- (AP1), pellets con estructura concéntrica -*pellets with concentric structure*- (AP2) y lluvias de barro -*liquid pellets*- (AP3). Estos a su vez fueron clasificados de acuerdo a su estructura interna en: cúmulos de ceniza -*Ash clusters*- (PC1) y partículas recubiertas -*coated particles*- (PC2) [13, 37]. Los AP2 fueron subdivididos en lapilli blindado -*armoured lapilli*- y lapilli con núcleo -*cored lapilli*- [1, 5, 32].

Las AP1 tuvieron una estructura semiesférica frágil y quebradiza entre 30 y 50% de porosidad, densidades de 1200 a 1600 Kg/m^3 , vesículas de 20-

200 μm , con agregados típicos en un rango de tamaños de 100 μm a unos pocos mm, rango de tamaño de partícula entre 1 a 400 μm ; valores medios de 30 a 90 μm ; unas cuantas partículas >1 mm [1].

El daño por impacto con ceniza volcánica dependió de la porosidad, tamaño y dispersión de partícula [23]. La deposición o *scattering* de ceniza generó adhesión electrostática que amortiguó el impacto y redujo el daño a la superficie.

Estudios demostraron que en la composición química de la ceniza volcánica se encuentra lo siguiente: dióxido de Silicio (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), Magnesia (MgO), óxido de Calcio (CaO), óxido de Sodio (Na_2O), óxido de Potasio (K_2O), dióxido de Titanio (TiO_2), pentóxido de fósforo (P_2O_5), trióxido de azufre (SO_3) [2, 38, 39, 40, 41, 42, 43].

Los modelos vesiculares de cráteres en la superficie de las partículas de ceniza volcánica presentaron diferentes morfologías, profundidades, bordes agudos e irregulares y una estructura interna porosa capaz de absorber agua [4, 27, 44, 45].

El desgaste erosivo con partículas sólidas de carburo de silicio angular (SiC) de tamaño entre 420 a 450 μm fue aplicado en tres ángulos de incidencia 30°, 45° y 90° sobre cerámicos base arcilla y materiales compuestos con ceniza volcánica, arena sílica y resina epóxica, a una velocidad de partícula de 24 ± 2 m/s, con una tasa de flujo abrasivo de 70 g/min durante 10 minutos a una distancia de 7 mm. Los materiales compuestos tuvieron una tasa de erosión menor que los otros materiales cuando fueron atacados a 90° reduciendo significativamente en los ángulos de 45 y 30° respectivamente [46].

Los recubrimientos de pinturas automotrices tienen el objetivo de proteger contra corrosión, cuando estas fueron afectadas por el impacto de piedras, derrames, limpieza en autolavados, *water jets* y ambientes químicos, presentaron delaminación hasta perder la estética [46, 47, 48, 49].

Se electrodepositó sobre el sustrato de la carrocería una capa cristalina tricatión de fosfato inorgánico mejorando la adhesión con la capa *coat*, esta fue la base para la capa anti-chip que proporciona resistencia al impacto, seguida de una capa de *primer* que protege de foto oxidación y permitiendo la adhesión de la capa de *base coat* solución con los pigmentos de pintura y por último la capa de *clear coat* que ofrece protección a la radiación *UV*, a decoloración y al pulido para obtener brillo, ofreciendo resistencia mecánica al rayado, micro abrasión (*MAR*) [50] y alta temperatura [51]; al exponerse a impactos que indujeron a la corrosión [53, 54, 55] fueron evaluadas las pinturas sobre superficies plásticas [56, 57, 58] a través de simulaciones numéricas [59], que cuantifican el desgaste adhesivo por *MAR* [60, 61, 62], *scratch* [63] y otros estudios utilizaron *micro-glass bead* para

evaluar la ruptura, fractura, contracción durante un impacto y delaminación [64], la caracterización mecánica y química de la durabilidad de los recubrimientos de pinturas automotrices [65, 66] y la erosión por partícula sólida en superficies con recubrimientos orgánicos [67, 68, 69].

Los recubrimientos de pintura fueron depositados sobre diferentes tipos sustratos de aluminio y acero. Estos fueron atacados con partículas de arena sílica de 4 a 150 μm , proyectiles de acero y carburo de silicio con diámetros de 3.15 a 32 mm y longitud de hasta 140 mm, con ángulos de ataque entre 12 y 90°, velocidades entre 0.05 a 230 m/s, tasa de flujo abrasivo de 0.27 a 90 g/min, tiempo de prueba 600 segundos y una distancia entre la boquilla y la superficie de impacto de 10 a 20 mm. La mayor erosión y delaminación fueron provocadas cuando el ángulo de ataque fue de 90° en pinturas esmalte comparadas con metálicas y estireno. [70, 71, 72, 73]. Por otra parte las capas de cerámicos, materiales compuestos y acrílico - melamina fueron analizados a velocidades de 24 a 55 m/s con tasa de flujo de 70 g/min durante un tiempo de prueba de 600 segundos a temperaturas entre 30 y 65°C, a una distancia entre la boquilla y la superficie de impacto de 7 a 20 mm. Las capas fueron 76% más resistentes a 65°C con respecto a las expuestas a 30°C [74, 75].

Introducción general.

Las exhalaciones provocadas por la actividad de los volcanes, ha originado diferentes problemas derivados por lluvia de ceniza volcánica, se considera un problema de salud para la población por la acumulación de gases y ceniza en las regiones circundantes a ellos [77], En ciudades como el D.F., Puebla, Cuernavaca o Tlaxcala [76], se estima que las personas han debido destinar un 5% de sus ingresos en atención médica por problemas de las vías respiratorias derivados de la lluvia de ceniza volcánica [78].

La lluvia de ceniza afecta directamente a los recubrimientos de pintura en las carrocerías de los automóviles sea en transito o estacionados por lo que se debe considerar hacer un diagnostico, además hay una planta armadora de vehículos a 40 km del cráter del volcán y que sus patios de estacionamiento son al aire libre.

El presente trabajo caracterizo la ceniza y adopto la proposición de utilizar una clasificación generalizada y actual.

Se hicieron estudios de métodos de aplicación de recubrimientos a las carrocerías de los automóviles para conocer las características que deben cumplir para hacer de un auto estético pero también para protegerlo del medio ambiente y las impurezas que contiene.

Se realizo la recopilación de metodologías previas de erosión por cavitación por partícula sólida con algunos abrasivos para comparar con ceniza volcánica caracterizada.

Se obtuvieron muestras de lámina de automóvil recubiertas con pintura aplicada de fábrica y ya atacadas se realizaron técnicas de caracterización de superficies.

Se uso equipo de microerosión para el lanzamiento de partículas, arena silica y ceniza volcánica tipo plume, los especímenes de área cuadrada fueron impactados a 10 mm de separación de los recubrimientos utilizando una boquilla de blasteo.

Fueron utilizadas técnicas de microscopia electrónica de barrido (*SEM*), de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (*EDS*) y nanoindentación para evaluar: La composición química de la ceniza volcánica, el grosor de las multicapas de pintura, las rugosidades, los tamaños de las huellas y las nanodurezas en las diferentes películas delgadas que forman los recubrimientos de pinturas.

Fueron utilizadas una cámara de alta velocidad y una cámara termográfica para medir la velocidad al impacto de las partículas y las variaciones de temperatura al momento del impacto en las cavidades respectivamente.

Las cavidades tuvieron profundidades varias en función del ángulo de ataque. Las huellas de desgaste provenientes de pruebas con ceniza volcánica fueron semejantes a las hechas con arena sílica. Las partículas de ceniza volcánica impactadas sobre la superficie perdieron sus vesículas, adoptando formas esféricas que disminuyeron el desgaste erosivo significativamente.

Con este estudio se logró conocer algunos de los fenómenos presentes en la deposición de ceniza volcánica en los recubrimientos de los automóviles durante las lluvias de ceniza y las consecuencias posteriores ocasionadas al sustrato para así buscar algunos métodos de evasión o limitación de los daños causados por ella.

Hipótesis.

Esta investigación pretende el modelado de la resistencia en pinturas multicapas nuevas aplicadas a carrocerías automotrices. Las superficies de los recubrimientos son objeto de impacto con partículas sólidas de ceniza volcánica $\leq 100 \mu\text{m}$, generando cavitación y desgaste erosivo, perdiendo gradualmente la estética y en casos severos corrosión.

Justificación.

Hasta el momento no se cuenta con referencias de los efectos negativos que por su excelente condición como abrasivo produce la ceniza volcánica en recubrimientos automotrices.

Por ubicación geográfica, existe la influencia de un volcán activo, además de industria automotriz en pleno crecimiento, lo que hace necesario una evaluación de esta y su comportamiento al impactar recubrimientos automotrices multicapas.

Planteamiento del problema.

Este trabajo pretende responder y aportar información a la sociedad en relación a la siguiente pregunta:

¿Que tanto impacta a los revestimientos automotrices exteriores el ser impactados por ceniza volcánica?

Objetivo general.

Reproducir en ambiente controlado las condiciones a que están expuestas las capas de pintura de los automóviles por la caída de ceniza volcánica ambiental para comprobar como se ven afectados con abrasión por cavitación de partículas solidas cuantificando los daños.

Objetivos específicos.

Simular el fenómeno de cavitación por partícula solida (ceniza volcánica), al impactar sobre superficies metálicas recubiertas con pintura automotriz.

Cuantificar daño causado por la cavitación de ceniza volcánica sobre pinturas automotrices.

Identificar las propiedades mecánicas y el daño causado a las diferentes capas que conforman una pintura automotriz.

Capítulo I.

1. Ceniza Volcánica.

1.1. Introducción.

El Volcán Popocatepetl Pertenece al Eje Neo volcánico transversal [79], que es una cadena de volcanes que atraviesa los Estados Unidos Mexicanos, esta comienza en el océano pacifico y termina en el golfo de México, pasando por los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, así como el estado de México y el Distrito Federal.

Este volcán está ubicado en las coordenadas geográficas 19.02°N 98.62°W; Se encuentra entre los límites de tres estados: Puebla, México y Morelos, es una elevación montañosa de 3020 metros y tiene sobre el nivel del mar una altura de 5452 metros.

La actividad del Popo ha originado problemas derivados por lluvia de ceniza volcánica y obstrucción de la luz solar en ciudades como el D.F., cuyo centro se encuentra a 72 km. del cráter del volcán, Puebla a 43, Cuernavaca a 63 o Tlaxcala a 53 [80].

El Popocatepetl visto desde el sur de la ciudad de Puebla (ver fig. 1).



Figura 1. Exhalación del volcán Popocatepetl formando una columna de ceniza.

1.1.1. Terminología sobre agregados de ceniza volcánica.

Los flujos de piroclásticos son mezclas de gases y cenizas volcánicas a altas temperaturas, Estos piroclásticos pueden viajar con velocidades de hasta 500 km/h, a temperaturas entre 300 y 400°C [81].

Los agregados de ceniza presentan una gama de tamaños, texturas y formas, desde agrupaciones frágiles de ceniza de tamaño sub-milimétricas hasta centímetros de tamaño de agregados concéntricos con laminaciones afiladas y graduadas [1, 2, 3].

Es de manifiesto la complejidad de la agregación de las partículas y la variedad de agregados, la terminología ha evolucionado [5], en 20 años, el término “*lapilli accretionary*” se ha usado para describir agregados no estructurados diferentes, ver figura 2:

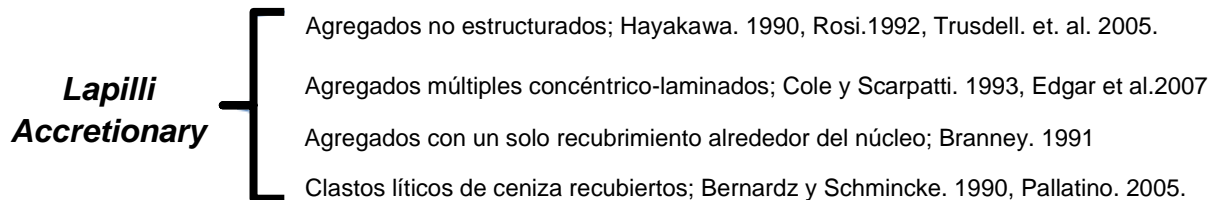


Figura 2. Agregados diferentes que se han descrito como “*lapilli accretionary*” en los últimos 20 años.

El uso de estos términos es inconsistente y crea confusión [5], se propone basar la designación sólo en la estructura interna, sustituir el término “*lapilli accretionary*” por “*pellet de acreción*”, para evitar las connotaciones de tamaño de partícula.

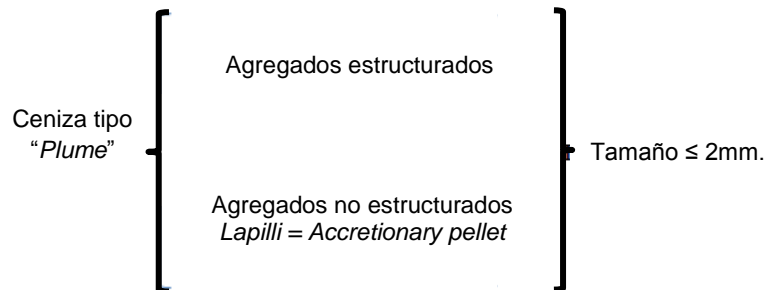


Figura 3. Tamaño y agregados de ceniza considerados Tipo *Plume*.

El tamaño de los agregados varía con la distancia del volcán: agregados proximales son más grandes hasta el tamaño de centímetros con estructuras concéntricas y los agregados distales son de tamaño de sub-milímetro.

Los Pellets de acreción se han dividido en tres categorías AP1 (*Poorly structured pellet*) pellet pobremente estructurado, AP2 (*Concentric structured pellet*) pellet con estructura concéntrica y AP3 (*liquid pellet*) lluvia de barro, lo que evita confusiones, ver figura 4.

Las partículas de ceniza volcánica provenientes de nubes eruptivas se acumulan por algunos mecanismos de unión y alcanzan mayores tamaños.

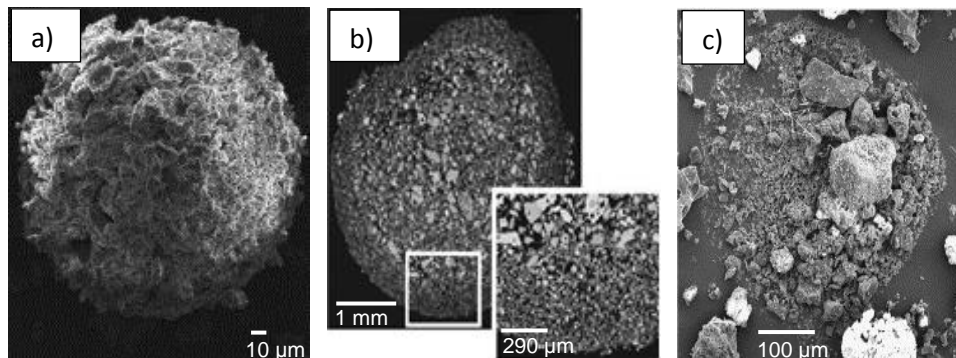


Figura 4. Tipos de agregados de ceniza volcánica según su morfología: AP1(a) de la erupción del volcán Eyjafjallajokull 2010, Islandia, AP2 (b) de Santorini y AP3 del volcán Eyjafjallajokull [32].

La agregación de partículas reduce el tiempo de residencia en la atmósfera de la ceniza mas fina, que resulta un aumento proporcional en la caída de esta en áreas de 10 a 100 km del volcán y una reducción de concentraciones en el aire de dicha ceniza fina hasta los 1,000 km de distancia del volcán.

Respecto a los mecanismos de formación se define un grupo de agregados llamados cúmulos de partículas, constituido por dos categorías, los *Ash Clusters*, “cúmulos de ceniza” (PC1) y *Coated particles*, “partículas recubiertas” [7], estos se pueden apreciar en la figura 5.

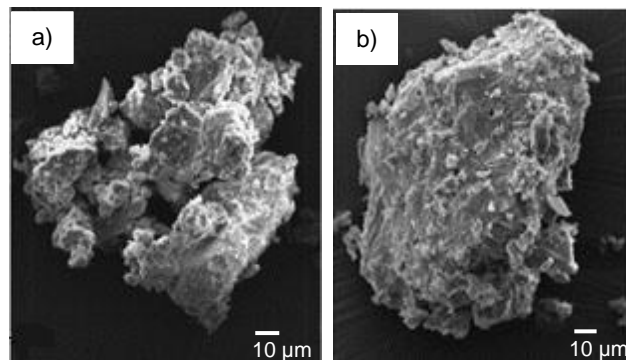


Figura 5. Tipos de agregados de ceniza volcánica según su mecanismo de formación PC1 (a) y PC2 (b), volcán Eyjafjallajokull 2010, Islandia [32].

Los agregados proximales son mayores y puede contener agua en el depósito (líquido o congelado); Agregados distales son mucho más pequeños, frágiles y a menudo llegan al suelo sin evidencia directa de la implicación de agua en el proceso de agregación, es decir, <15 km dependiendo de la altura de la columna, y distal para regiones ser más allá de los 15km [21].

1.1.2. *Partículas expulsadas de un volcán durante una erupción.*

Durante una erupción volcánica magma, *tephra* y gas son expelidos a la atmosfera por conducto del cráter, *tephra* son fragmentos volcánicos sólidos.

Son conocidos con el termino ceniza (*ash*) fragmentos menores a 2 mm, otros entre 2 y 6.4mm son conocidos como "*Lapilli*" y los mayores a 6.4 mm son llamados "*blocks*", La relativa abundancia de estos productos depende de la explosividad del magma y su composición química [5].

1.1.3. *Segregaciones de partículas volcánicas denominadas fall out.*

Se ha observado cayendo durante y posterior a erupciones volcánicas precipitados (*Fall out ash*) $>100\mu\text{m}$, estos forman agrupaciones de ceniza débilmente enlazadas (PC1) que se fracturan al impacto y también, pero en menor cantidad agregados subesféricos AP1, AP2 y AP3.

Las escalas de tiempo de la formación de agregados son cortas: los agregados AP1 fueron depositados en los cinco minutos siguientes a la aparición de la erupción y los agregados congelados, AP2 llegaron a la tierra en menos de 10 minutos.

Se deduce que la lluvia mejora la agregación y reduce la suspensión en el aire de concentraciones de masa fina de ceniza [8].

1.1.4. *Hipótesis del origen de la Lapilli accretionary.*

Las observaciones directas han demostrado que la mayor parte de grano fino o partículas caen de columnas de ceniza volcánica como agregados [12]. Todos los agregados caen con velocidades sustancialmente mayores que sus partículas componentes [14].

La estructura al impactar en el suelo se colapsa y rompe perdiéndose el registro geológico, la *lapilli accretionary* es el agregado mejor preservado en desvanecimientos volcánicos.

Los agregados que después del impacto son identificables se conocen como estructuras cementadas relativamente de baja porosidad.

La acreción crece como resultado de las diferencias en las velocidades de caída de partículas recubiertas por colisión, se proponen dos hipótesis para la formación de *accretionary lapilli*:

- (1) Las partículas recubiertas con capas de líquido en las columnas volcánicas evolucionan por colisión y coalescencia de *acreción lapilli*, debido a la gran masa inicial de líquido por unidad de masa de partículas.

(2) Evaporación parcial de agua, un grado sustancial de movilidad que tienen las partículas dentro de la gota líquida les permite acomodarse y generar zonas concéntricas de grano de diferente tamaño.

La alta y rápida reactividad de la ceniza [38] está asociada con su alto contenido de cristales de los elementos implicados en la consistencia de las muestras; Al, Be; Zn, Fe, F, P, Mn, Ba, Sr, Li, Ti, Rb, Cu, Ni, Sb, Pb, At, Cr.

La interacción ceniza-agua introduce cambios en el Ph lo cual, puede constituir en el medio ambiente un riesgo potencial para la salud; algunos de estos elementos están incluidos en una lista de tipos de agua no apta para consumo humano.

1.1.5. Observaciones geológicas.

Los agregados *lapilli accretionary* se componen por completo de ceniza y se definen por el tamaño (2-6.4 mm de diámetro), clasificados en dos tipos morfológicos: *Rim* Aquellos compuestos de núcleos de ceniza de grano grueso rodeados de grano fino y *llantas*, aquellos en los que la distribución de tamaño de grano en el núcleo es igual y tienen el borde abrupto.

La porosidad y densidad fueron 0,3-0,5% y 1200-1.600 kg/m³, respectivamente, en la fig. (6) se muestra un modelo de dispersión de ceniza con el software *Fall 3D-6.2* del 14 de mayo de 2014 con la cantidad de ceniza arrojada del volcán Popocatépetl en toneladas por metro cuadrado.

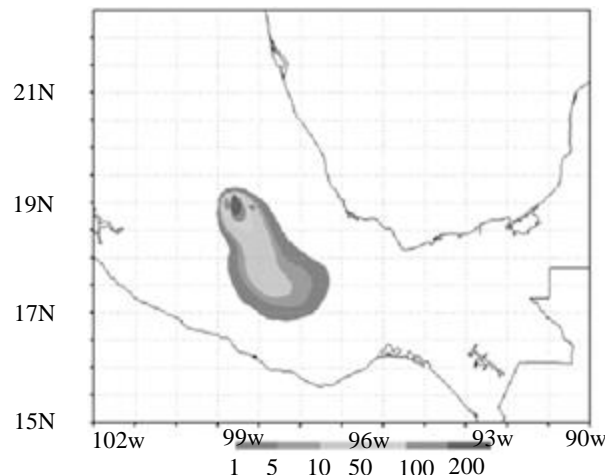


Figura 6. Modelo de dispersión de ceniza 14 de mayo de 2014 8:00hr. (t/km²) base en *Fall 3D-6.2* [9].

1.1.6. Mecanismos de Contacto.

Durante la actividad volcánica las erupciones volcánicas generan una considerable cantidad de cenizas por desgasificación y fragmentación del magma, esto permite generar sólidos cargados eléctricamente y gases volcánicos (iones), la transferencia de carga eléctrica y la generación de iones tiene lugar durante la fractura de materiales [23].

La atracción electrostática es particularmente importante para la creación y crecimiento de la *lapilli accretionary*, durante la formación inicial del núcleo y para la incorporación de partículas muy pequeñas.

1.1.7. Medio líquido.

Las partículas que comprenden agregados de cenizas están vinculadas a través de hidroenlaces, las fuerzas electrostáticas y la tasa de agregación de partículas se correlaciona con la disponibilidad de agua líquida en las nubes.

1.1.8. Mecanismos de unión.

La ceniza volcánica tiende a aglomerarse por medio de los siguientes mecanismos:

1.1.8.1. Tensión superficial (fuerzas capilares).

Las columnas de erupción volcánica contienen: Vapor de agua, dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno y dióxido de carbono, se forman líquidos cuando los gases se condensan debido a la temperatura y la presión conforme la columna eruptiva asciende a la atmósfera, el vapor de agua arrastrado desde la atmósfera comprende la mayor parte del agua de condensación de la erupción volcánica [8].

Cuando las partículas recubiertas de líquidos colisionan tienen una alta probabilidad de unión pero requieren mínimo entre 10 y 30% de su volumen en agua [9], y grandes volúmenes de condensados dentro de las columnas volcánicas da lugar a precipitación localizada, estas gotas tienen valores de pH bajos [14].

1.1.8.2. Fuerzas electrostáticas.

Si las partículas cargadas secas se atraen y colisionan generan enlaces como resultado de su carga eléctrica, se neutralizan y son incapaces de migrar.

La fuerza de la gravedad en partículas menores a 600 μm de diámetro supera a las fuerzas capilares, las fuerzas de van der Waals y a la fuerza de la unión electrostática [24] y por la porosidad, estos agregados secos frágiles se unen por fuerzas electrostáticas entre ellos durante el transporte a través de la atmósfera [6].

Una vez que tales agregados impactan en el suelo, ceden su carga eléctrica a tierra, sucede la desagregación y el fracaso de la estructura.

1.1.8.3. *Fuerzas de Van der Waals.*

Proporcionan atracción de corto alcance entre partículas [24], son un orden de magnitud más pequeña que las fuerzas capilares y que las fuerzas electrostáticas en separaciones $>1\text{cm}$.

1.1.8.4. *Enclavamiento mecánico.*

Es otro método de unión, se obtiene cuando las partículas por su morfología angular en forma de gancho se unen.

En la figura 7 se tiene una micrografía que muestra un cristal de origen volcánico caracterizado por gran cantidad de vesículas.

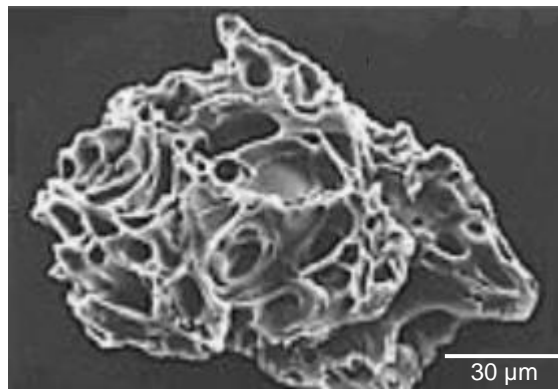


Figura 7. Micrografía de un cristal vesicular, fragmento de un cristal de ceniza de .01mm, expulsado el 18 de mayo de 1980 del monte *St. Helens* [19].

1.1.9. *Composición química de la ceniza volcánica.*

La composición química de la ceniza volcánica es relativamente alta en sílice en comparación con otros cristales minerales, y baja en elementos de no sílice (Mg y Fe principalmente) [42], en la tabla uno se muestra el porcentaje en que están presentes compuestos químicos de cinco partículas de ceniza volcánica realizada con el software *WDS Data*.

Tabla 01 composición química en % según WDS data.

Compuest o	Partícula 1	Partícula 2	Partícula 3	Partícula 4	Partícula 5
Na ₂ O	2.2	4.1	3.8	6.8	0.8
MgO	3	5.7	6.5	1.5	13.2
Al ₂ O ₃	17.7	13.5	14.4	31.9	16.7
SiO ₂	62.3	48.8	48.3	45.5	38.4
K ₂ O	3.3	0.5	0.4	6.9	5.9
CaO	0.7	8.9	9.1	1.8	0.2
TiO ₂	1.1	3.4	2.8	0.5	2.8
FeO	9.9	15.2	14.6	5.1	22.1

Los principales gases lanzados a la atmosfera durante la actividad volcánica son: vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre, hidrogeno, sulfuro de hidrogeno, monóxido de carbono, cloruro de hidrogeno y algunos otros componentes como sulfuros, halógenos y metales.

Los ácidos, sales y bases son absorbidos por las superficies *tephra* por ser altamente solubles e inducen cambios bioquímicos, haciendo la ceniza corrosiva, conductora de calor y electricidad.

En la tabla 2 se muestra el porcentaje de los compuestos químicos presentes en la ceniza volcánica.

Tabla 02. Compuestos químicos que componen la ceniza volcánica.

compuestos químicos	Símbolo	%
Sílice	(SiO ₂)	59.32
Alumina (Al ₂ O ₃)	(Al ₂ O ₃)	17.5
Oxido ferroso	(Fe ₂ O ₃)	7.06
Oxido de Calcio	(CaO)	6.1
Oxido de Sodio	(Na ₂ O)	3.8
Magnesia	(MgO)	2.55
Oxido de Potasio	(K ₂ O)	2.03
Trioxido sulfúrico	(SO ₃)	0.71
Perdidos en ignición		1.0

1.1.10. Propiedades físicas.

La densidad de las partículas individuales de piedra pómez varía entre 700 y 1200 kg / m³, los fragmentos de vidrio 2350-2450 kg / m³, los cristales 2700-3300 kg / m³, y para partículas de líticos 2600 a 3.200 kg / m³ [82].

1.2. Usos de la ceniza volcánica.

Los usos de la ceniza volcánica se basan en sus propiedades físicas de tamaño, ángulo de las partículas, capacidad de conducción de calor, color, y sus aplicaciones en la industria química por sus propiedades piroquímicas permite usarla como:

- Abrasivo.
- Cerámica.
- Esmaltes.
- Vitroesmaltes.
- y en la industria textil [83].

Capítulo II

2. Tribología.

2.1. Definición y campo de estudio de la Tribología.

Término que proviene del griego “*τρίβω* o *tribō*”, que significa frotar o rozar y “logia” que significa ciencia por lo que se traduce como “la ciencia del rozamiento” [84].

Tribología. Es la ciencia de la interacción de superficies en movimiento relativo, el estudio de la fricción, desgaste y lubricación [85].

El concepto de Tribología se usó por primera vez en un informe de la comisión del ministerio de educación y ciencia de la Gran Bretaña el 9 de marzo de 1966 y se reconoce a esta como el nacimiento de una nueva disciplina científica [86].

Un Tribosistema es un esquema representativo de los mecanismos, propiedades y condiciones de prueba en que se lleva a cabo el fenómeno de desgaste ver figura 8.

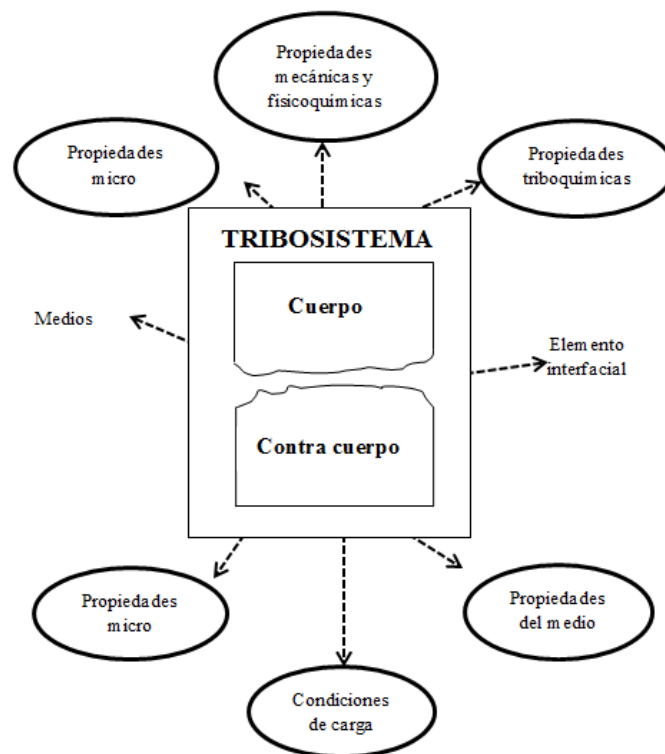


Figura 8. Tribosistema.

La tribología estudia las características superficiales que afectan el área de contacto entre las capas exteriores de los cuerpos cuando se genera:

- Fricción
- Desgaste y
- Lubricación.

2.1.1. Fricción.

Es una fuerza actúa en dirección opuesta o de resistencia al deslizamiento que ocurre entre cuerpos y depende de las características de las superficies, se debe entender la resistencia al movimiento por la interacción entre puntos de un área contacto y la penetración de las asperezas entre ellos, (fricción) se debe conocer:

- a. La interacción molecular (adhesión) de las superficies.
- b. La interacción mecánica entre las partes.

La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema y existen tres leyes:

- 1.- La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal.
- 2.- La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto entre las superficies deslizantes.
- 3.- La fuerza de fricción es independiente a la velocidad de deslizamiento [87].

2.1.2. Desgaste.

El termino “desgaste” deriva del idioma ingles *wear* que proviene del termino griego *usura* [93] y se define: 1.- como la acción de causar deterioro por uso y 2.- el desplazamiento o desprendimiento de material en la capa superficial de una superficie sólida por la interacción de otra superficie;

La interacción mecánica es deslizamiento o rodamiento entre superficies sólidas y se caracteriza por un alto coeficiente de fricción.

El resultado del desgaste, es la disminución de dimensiones y pérdida de las tolerancias, los mecanismos de desgaste en los materiales son principalmente: Deformación plástica, formación y propagación de grietas y corrosión.

2.1.3. Lubricación.

La lubricación es el proceso o técnica empleada para reducir el desgaste de superficies en estrecha proximidad y en movimiento relativo entre sí, esto se obtiene mediante la interposición de una sustancia llamada lubricante entre las superficies para llevar o para ayudar a llevar la carga (presión generada) entre superficies opuestas. La película de lubricante interpuesta puede ser un sólido, una dispersión sólida / líquida, un líquido, una dispersión líquido-líquido (una grasa) o, excepcionalmente, un gas [88].

2.1.3.1. Los regímenes de lubricación.

Cuando la carga aumenta entre las superficies de contacto, tres situaciones distintas se pueden observar con respecto al modo de lubricación, que se llaman los regímenes de lubricación [89] y que se encuentran ilustrados en la figura 9:

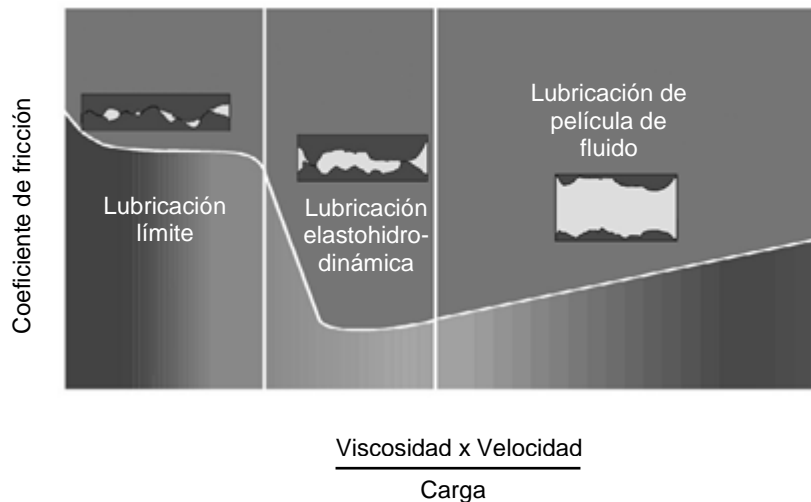


Figura 9. Curva de regímenes de lubricación [90].

2.1.3.1.1. Lubricación de película de fluido.

Es el régimen de lubricación en el que a través de las fuerzas viscosas la carga es totalmente compatible con el lubricante dentro del espacio o hueco entre las partes en movimiento relativo de uno a otro objeto (conjunción lubricada) y el contacto sólido-sólido se evita.

- Lubricación hidrostática es cuando se aplica una presión externa para mantener la película de lubricante fluido donde de otro modo habría desaparecido.

- La lubricación hidrodinámica es cuando se utiliza el movimiento de las superficies de contacto, es necesario un diseño exacto, bombea lubricante alrededor del cojinete para mantener la película lubricante y no se puede usar cuando se inicia, detiene o invierte, ya que la película lubricante se rompe.

2.1.3.1.2. *Lubricación elastohidrodinámica.*

Para superficies con condiciones de carga más altas, los cuerpos sufren deformaciones elásticas en el contacto, esto crea un área de soporte de carga, que proporciona un espacio casi paralelo para que el lubricante fluya, el movimiento de los cuerpos en contacto genera una presión inducida por el flujo, que actúa como la fuerza de apoyo sobre el área de contacto.

En tales regímenes de alta presión, la viscosidad del fluido puede aumentar considerablemente, en la lubricación elastohidrodinámica completa la película lubricante generada separa completamente las superficies.

2.1.3.1.3. *Lubricación límite (también llamada lubricación de película límite).*

Es el régimen en el que la carga es transportada por las asperezas de la superficie y no por el lubricante, constituyentes químicamente reactivos del lubricante reaccionan con la superficie de contacto formando una película de alta resistencia y tenaz sobre las superficies sólidas en movimiento.

2.2. *Clasificación del desgaste.*

Según la clasificación de desgaste de *Burwell* [91], se divide de acuerdo al mecanismo mediante el cual se produce:

2.2.1 *Desgaste adhesivo.*

Se llama desgaste adhesivo o por fricción al resultado de la interacción mecánica en el área de contacto entre dos cuerpos en movimiento y bajo presión.

La figura 10 muestra lo severo y común es este desgaste en la industria ya que constituye el inicio del deterioro entre las superficies de metales al producirse roce sobre ellos y provocar ralladuras irregulares y superficiales.

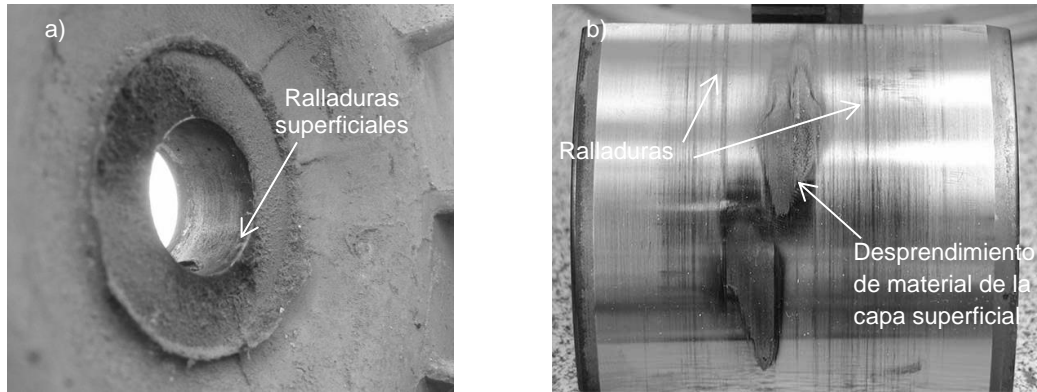


Figura 10. Aspecto de piezas con desgaste adhesivo; a) ralladuras y b) remoción de superficie.

2.2.2. Desgaste abrasivo.

Cuando dentro del área de contacto entre dos cuerpos se localizan partículas de un tercero que provoca deformación plástica local, micro-ralladuras y micro-cortes hasta la destrucción de la superficie con menos dureza, estas partículas pueden estar presentes al ser desprendidas por los mismos cuerpos o pertenecer a un tercer cuerpo diferente y se conocen como “debris”, se introducen en la estructura de otro material mediante el deslizamiento plástico en presencia de un movimiento tangencial.

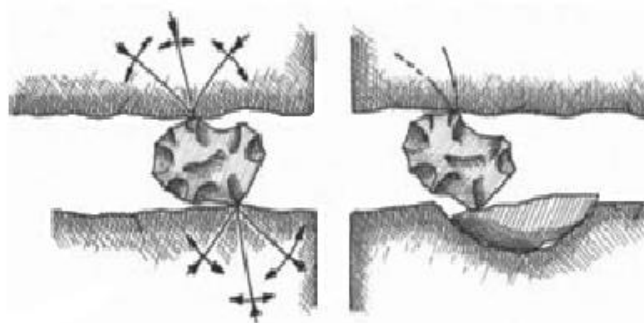


Figura 11. Acción abrasiva de partículas sobre material base.

Existen dos mecanismos básicos del desgaste abrasivo:

- Mecanismo de microcorte. Ocurre en las capas superficiales cuando se sobrepasa el límite de rotura del material y la aspereza o partícula abrasiva tiene mayor dureza.
- Mecanismo de deformación plástica o microdeformación. Sucede cuando dos materiales interactúan entre si y el de mayor dureza rebasa el límite de rotura pero esta debajo del valor crítico de

penetración del otro cuerpo, se produce deformación plástica, ilustrada por rayado o raspado de las superficies.

Estos mecanismos de abrasión generan microdeformación plástica ilustrada por la aparición en la superficie del material de: a) Microsurcado; b) Formación de proas y c) Microcorte.

La proporción de material desplazado a los lados con respecto al volumen del surco de material es la relación entre microsurcado y microcorte, que depende del ángulo de ataque de la partícula abrasiva.

Existen dos tipos de desgaste abrasivo que son:

2.2.2.1. *Desgaste abrasivo dos cuerpos.*

El desgaste es causado por rugosidades de mayor dureza pertenecientes a una de las superficies en contacto y;

2.2.2.2. *Desgaste abrasivo a tres cuerpos.*

El desgaste es provocado por partículas de mayor dureza presentes entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo.

El método más común para medir el desgaste es por la pérdida de masa que experimenta el material después de una prueba [92].

2.2.3. *Desgaste corrosivo y clasificación de la corrosión.*

Es una reacción química o electroquímica (oxidoreducción) natural o inducida que provoca la pérdida regular de la superficie de un material, existen factores que influyen la corrosión atmosférica, son el material, la temperatura, la presencia de contaminantes en el ambiente y la humedad, además de que es un proceso cíclico[93].

Los tipos de corrosión se pueden clasificar en general o uniforme y localizada [94].

2.2.3.1. *Corrosión general o uniforme.*

Esta corrosión produce más daños en el material con mayor proporción de área y se encuentra presente en todo el planeta, se divide en:

2.2.3.1.1. *Atmosférica.*

Los metales están expuestos a la atmósfera y se ven atacados por oxígeno y agua, lo que da lugar a ser oxidados de dos maneras:

- Oxidación lenta. Ocurre en los metales a causa del ambiente, causando corrosión, pérdida de brillo y otras propiedades características, desprendiendo cantidades de calor inapreciables; al fundir un metal se acelera la oxidación, pero el calor proviene principalmente de la fuente que derritió el metal y no del proceso químico (una excepción sería el aluminio en la soldadura autógena).
- Oxidación rápida. Ocurre durante lo que ya es una combustión, con cantidades apreciables de calor, en forma de fuego, ocurre principalmente en sustancias que contienen carbono e hidrógeno, (Hidrocarburos).

El termino “oxidación” es usado porque en las reacciones, la transferencia de electrones se da mediante adquisición de átomos de oxígeno (cesión de electrones) o viceversa, la reacción química opuesta a la oxidación se conoce como reducción, estas reacciones siempre se dan juntas, la figura 12 muestra a) corrupción total y b) un metal con oxidación.

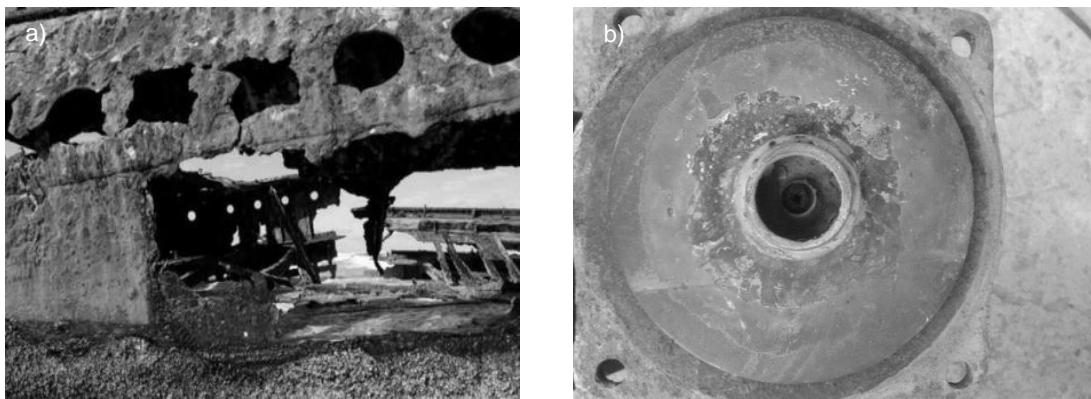


Figura 12. Ilustración de la corrosión a) Embarcación convertida en herrumbre por la atmosfera marítima y b) Impulsor de una bomba hidráulica oxidado por la presencia de humedad.

Esta clase de corrosión se incrementa con sal, compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos, se divide según ambientes atmosféricos:

- Industriales. Contienen compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que pueden promover corrosión en metales.
- Marinos. Se caracterizan por la presencia del clorídeo, un ion perjudicial que favorece la corrosión de los metales.
- Rurales. Se produce la menor clase de corrosión atmosférica, caracterizada por bajos niveles de compuestos ácidos y otras especies agresivas.

2.2.3.1.2. Galvánica.

Es una forma de corrosión acelerada que ocurre cuando metales distintos (con distinto par redox) [95] se unen eléctricamente en presencia de un electrolito, puede ser uniforme o localizado en la unión entre aleaciones, dependiendo de las condiciones.

Las Celdas Galvánicas producen esta forma de corrosión, cuando la reacción de oxidación del ánodo se va produciendo se van desprendiendo electrones de la superficie del metal que actúa como el polo negativo de la pila (el ánodo) y así se va produciendo el desprendimiento paulatino de material desde la superficie del metal.

2.2.3.1.3. Metales Líquidos.

Es una degradación de los metales en presencia de ciertos metales líquidos como el Zinc, Mercurio, Cadmio.

2.2.3.1.4. Altas Temperaturas.

Esta clase de corrosión actúa al estar expuesto el metal al gas oxidante, sin la presencia de un electrolito, formando una pequeña capa sobre el metal, producto de la combinación entre el metal y el gas en condiciones de alta temperatura, esta actúa como un “electrolito sólido”, que permite que se produzca la corrosión de la pieza metálica mediante el movimiento iónico en la superficie.

2.2.3.2. Localizada.

Forma de corrosión donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas, se subdivide en otros tipos de corrosión.

2.2.3.2.1. Corrosión por Fisuras (Crevice).

Es la que se produce en cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal con un elemento no-metálico, en las fisuras de ambos materiales se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza, en estos casos, es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca saldrá de la fisura.

2.2.3.2.2. Corrosión por Picadura (Pitting).

Es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo que afectan superficies con poca corrosión generalizada, ocurre como un proceso de disolución anódica local.

Esta clase de corrosión posee formas derivadas:

- Corrosión por fricción (*Fretting*): se produce por el movimiento pequeño, como una vibración de dos sustancias en contacto, una o ambas son metales, este movimiento genera una serie de picaduras en la superficie del metal que, protegidas por los productos de la corrosión sólo son visibles cuando estos son removidos.
- Corrosión por cavitación: es la producida por la formación y colapso con burbujas de fluido impactando la superficie de un metal.
- Corrosión selectiva: La corrosión del metal involucrado genera una capa que recubre las picaduras y hace parecer al metal corroído como si no lo estuviera, por lo que es muy fácil que se produzcan daños en el metal al someterlo a una fuerza mecánica, es semejante a la corrosión por deszincado, es selectiva porque actúa sólo sobre metales nobles como al Plata-Cobre o Cobre-Oro.
- Corrosión microbológica (*MIC*). Son la causa de falla organismos biológicos que actúan como aceleradores del proceso corrosivo localizado acelerando el transporte del oxígeno a la superficie del metal, generalmente en medios acuosos.

2.2.4. Por fatiga superficial.

Es cuando la acción de tensiones o esfuerzos superficiales genera grietas donde las superficies rozantes están separadas por una película de lubricante, este proceso esta relacionado con ciclos de tensiones en el contacto por rodadura o por deslizamiento, [86].

El deterioro se produce porque la superficie del material se encuentra sometida en un período de trabajo a tensiones de tracción y compresión, este empieza con un dentado por presión (protuberancias), y una repetición de alta carga (presión inversa) en la protuberancia causa la fatiga de la superficie (*pitting*), lo que en principio da la apariencia de una superficie mate, pero esto no es un desplazamiento.

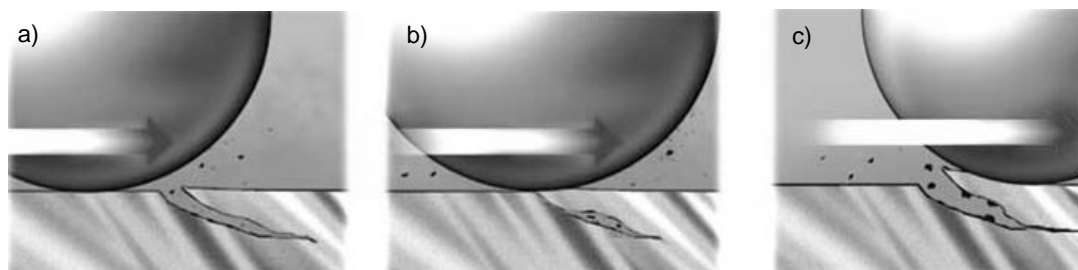


Figura 13. Desgaste por fatiga superficial; a) Hay una grieta e inicia el ciclo de trabajo, b) Agrandamiento de la grieta por la repetición del ciclo de trabajo, c) Una falla superficial inicia la fatiga.

2.2.5. Erosión.

Es resultado del impacto a una superficie con partícula sólida en un movimiento casi paralelo respecto de dichas superficies y que utilizan como medio erosivo un fluido.

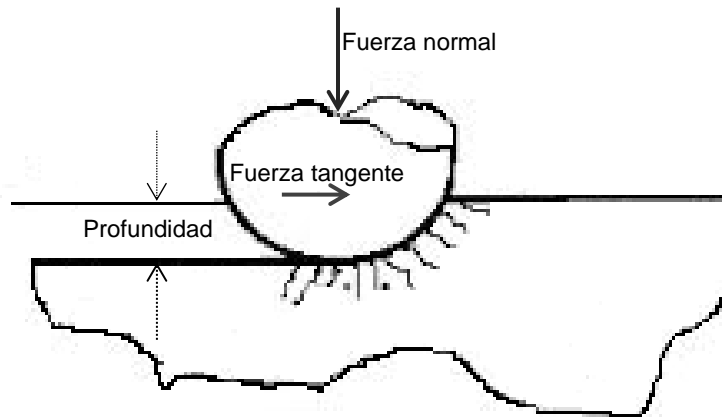


Figura 14. Mecanismos de remoción de material que actúan durante desgaste erosivo cuando una partícula sólida colisiona una superficie plana.

Cuando un material dúctil es impactado, se forman cráteres en su superficie, alrededor de los cuales aparece una pequeña proa constituida de material removido después de múltiples impactos, la forma y tamaño de los cráteres formados dependen (entre otras variables) de la velocidad, tamaño y ángulo de impacto de las partículas.

2.2.5.1. Desgaste erosivo por impacto o cavitación por partícula sólida.

Cuando la acción erosiva es normal a la superficie erosionada, se denomina erosión por impacto o cavitación, el desgaste por impacto es un movimiento de deslizamiento corto donde dos cuerpos sólidos interactúan en un intervalo de tiempo excepcionalmente corto.

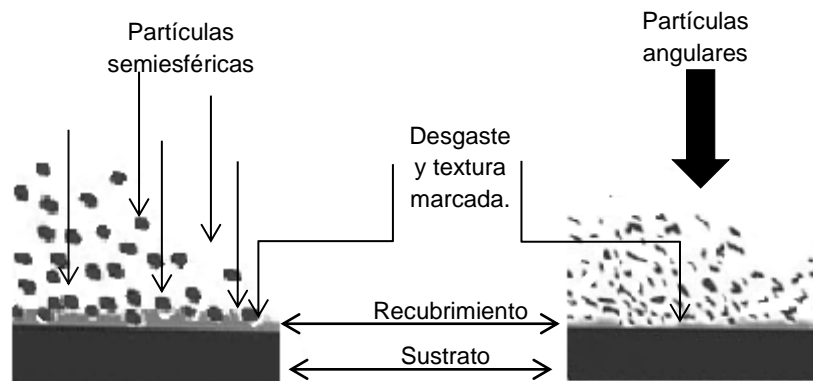


Figura 15. Cavitación por partícula sólida (semiesférica y angular).

Capítulo III

3. Recubrimientos automotrices y procesos de aplicación.

Los acabados de pintura automotriz son recubrimientos multicapas que están diseñados a base de polímeros para proporcionar una resistencia mecánica al rayado y la micro-abrasión [96].

3.1. Expectativas para los acabados de pintura automotriz.

Las expectativas para acabados de pintura deben cubrir ciertas características como hacer estético al automóvil y tener un desempeño funcional que permita superar la fotooxidación, los efectos de la lluvia acida, los ambientes químicos para la limpieza en los autolavados además de los impactos de rocas de dimensiones menores; ya que son factores indeseables.

3.2. Nombre y funciones de las capas de recubrimientos de pintura automotriz.

Los recubrimientos de los automóviles están compuestos de varias capas hechas con materiales diferentes que deben cumplir ciertas funciones [50] ver figura 16.

Los sustratos utilizados en la industria del automóvil pueden ser de: aluminio, fibra de carbono o chapa de acero galvanizado; con una aplicación de película cristalina tricatión, que es un tratamiento con fosfato inorgánico fino para mejorar la adherencia y también ofrecer protección contra la corrosión, es la primera capa de cinco.

La segunda capa es un polímero que se conoce como *catophoretic coat* o *e coat*, es electrodepositada sobre el metal, esta capa tiene el propósito de ofrecer protección contra la corrosión sobre toda la carrocería del auto.

La siguiente capa de pintura se llama *anti-chip*, se pulveriza sobre la *e coat* antes de que esta complete el proceso de curado, esto se conoce como una aplicación “húmedo sobre húmedo” está ofrece durabilidad al impacto de piedras pequeñas, es una película de poliuretano flexible o *PVC*, su espesor puede variar de 60 μm en el todo hasta 110 en partes bajas como piso y lienzos.

El *Primer* o capa de imprimación, es pulverizado sobre la capa de *antichip* para dar resistencia adicional a la fotooxidación y a las operaciones de pulido, esta es un recubrimiento a la carrocería que está diseñado para

adherirse a las superficies y para formar una capa de unión con mejores características para servir como fondo a la pintura base.

La capa de laca base o *base coat* es pulverizada y aplicada por sistemas electrostáticos, esta capa contiene los pigmentos que darán el color y/o acabado metálico al automóvil.

La capa de transparente *clear coat* es pulverizada y aplicada por sistemas electrostáticos, es una solución cuyas funciones son absorber la radiación UV, dar brillo y ofrecer protección mecánica a la capa de color contra los mecanismos de abrasión e impacto de rocas de dimensiones menores.

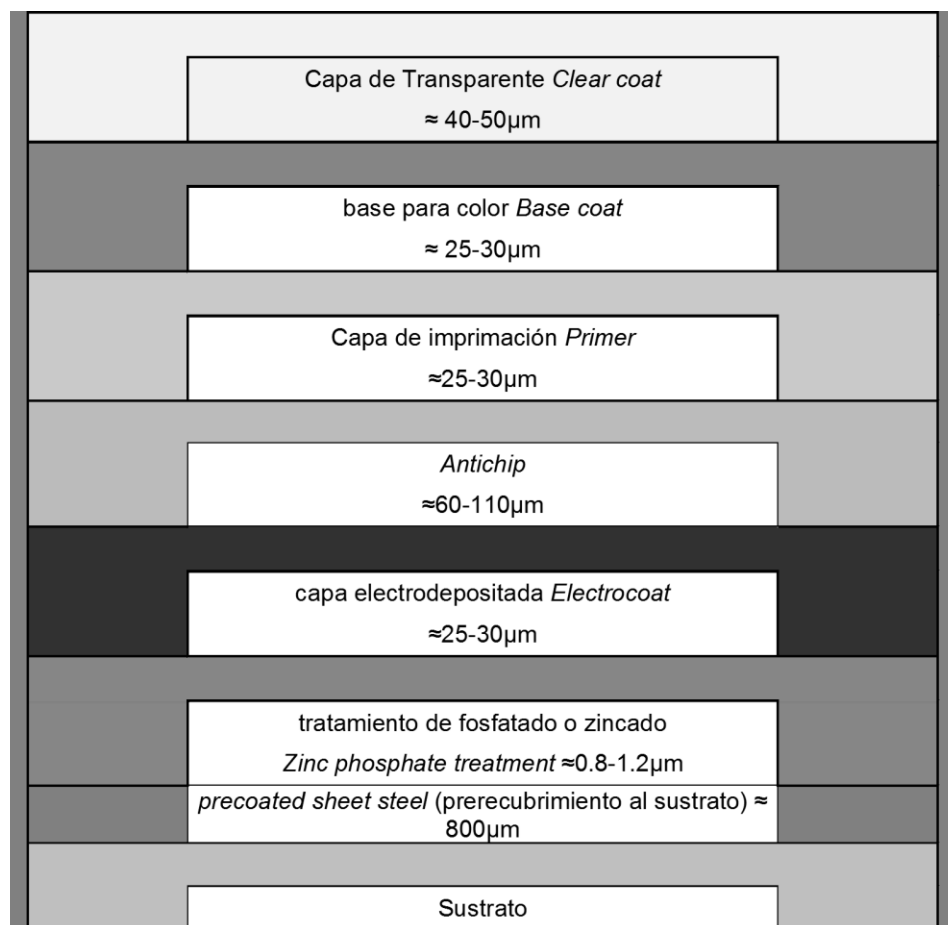


Figura 16. Grosos de las capas de recubrimiento de una pintura automotriz [50].

3.3. Tipos de recubrimientos de la base coat y clear coat automotrices:

- *Esmalte.*
- *Acrílico.*

3.3.1. Esmaltes.

Son recubrimientos vítreos conocidos como resinas *epóxi*, están compuestos de dos componentes, una parte que contiene partículas de pigmento sólido y otra con un catalizador que inicia la reacción, deben iniciar un endurecimiento al ser mezclados y se aplican por pulverizado.

Los catalizadores normalmente son aminas o poliamidas conocidas como poliepóxidos y se pueden hacer reaccionar de tres formas:

- Reacción de reticulado (*cross linked*). Se refiere al curado por exposición al medio ambiente.
- A través de homopolimerización catalítica, se forma un polímero termoendurecible, con propiedades mecánicas como: alta dureza, temperatura y resistencia química.
- Por heteropolimerización con aminas polifuncionales, ácidos o anhídridos de ácido, fenoles, alcoholes y tioles, que se utilizan como agentes de curado, de esta forma se obtienen las pinturas automotrices [97].

3.3.2. Acrílicos.

El acrílico es un poliéster llamado ácido acrílico basado en ácido propenoico ($-CH_2=CHCO_2H$), utilizado en la industria de los revestimientos de superficie (pinturas); también se utiliza en forma de lámina o película por su durabilidad y transparencia excepcional, se produce en un proceso de dos pasos:

Paso 1. Producción del monómero acrilato de alquilo, se forma a partir de la reacción entre ácido acrílico y un alcohol.

Paso 2. Polimerización. Es un proceso químico por el que los reactivos o monómeros se agrupan químicamente entre sí, cuando se añaden a uno de los extremos del doble enlace formando un radical polimerizado dando lugar a una molécula de gran peso o un radical (molécula con un número impar de electrones).

Este proceso es potencialmente dañino para el medio ambiente por las emisiones gaseosas y los líquidos de desecho, que deben ser tratados en el lugar en que se originan para asegurar que cumplen con las regulaciones de la autoridad local, esta reacción se lleva a cabo en agua en lugar de un disolvente para minimizar el impacto ambiental [98].

Las propiedades de los acrílicos resultantes varían dependiendo de la naturaleza de los grupos alquilo en el alcohol y el ácido acrílico además, los productos formados por la reacción de un ácido acrílico y alcohol son esteres y polimerizan fácilmente para formar plásticos transparentes.

La capa transparente que lleva una pintura para automóvil al final del proceso de pintado se llama uretano y es una clase de compuestos que tienen en común el grupo carbamido $R-NH-C(=O)-O-R^2$ y son, por lo tanto, formalmente derivados del ácido carbámico, se forma fácilmente en la reacción del cianato ($R-N=C=O$) con alcohol R_2OH , se obtiene en polvo granulado blando o en cristales sin color.

La característica más valiosa de los poliuretanos es el acabado brillante que impermeabiliza y ofrece resistencia a los ambientes químicos en la superficie que se aplica comparado con otro tipo de pinturas [99].

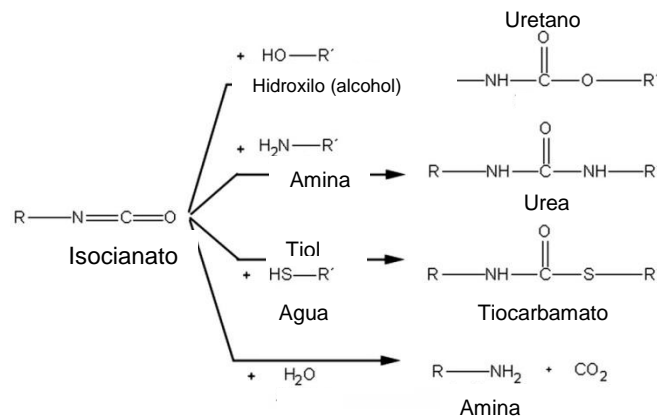


Figura 17. Reacciones del grupo Isocianato.

El poliuretano es alto en contenidos sólidos, lo que lo hace de secado lento comparado con otros compuestos que genera una película de mayor dureza [106] y es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere superficies claras y duraderas, como en la industria aeronáutica y la automotriz.

Las propiedades físicas o mecánicas de los acrílicos (tales como brillo, dureza, adherencia y flexibilidad) se pueden modificar mediante la alteración de la composición de la mezcla de monómeros utilizada en el proceso de polimerización.

3.4. Proceso de aplicación de capas de pintura que componen el recubrimiento de un auto.

El pintado de la carrocería se divide en dos fases [100].

3.4.1. Primera fase.

Todas las superficies de la carrocería se someten a un proceso de preparación de pintado que incluye:

Lavado: aspersión y/o inmersión de la carrocería en una solución acuosa desionizante y desengrasante que tiene por finalidad la eliminación de suciedades e impurezas de la superficie del sustrato.

Desengrasado: Eliminación de las grasas y aceites de protección de los aceros y aluminios, a través de etapas de inmersión o aspersión en medio ácido o alcalino (reacciones de saponificación con obtención de los alcoholes y sal alcalina del ácido), es necesaria la utilización de agentes que eviten espumas habitualmente de naturaleza polimérica.

Los disolventes cada vez se utilizan menos, tanto por razones medioambientales como de seguridad.

Lavado: Eliminación de los restos alcalinos procedentes del desengrasado, por inmersión y aspersión con agua desmineralizada.

Secado: Posteriormente se aplica este proceso de secado para eliminar cualquier resto de humedad y evaporar los productos empleados en la limpieza con una temperatura de 50 °C, la figura 18 muestra una carrocería que ha sido lavada y secada para pasar a la siguiente fase de pintura.



Figura 18. Imagen de una carrocería al iniciar el pre tratamiento de pintura.

3.4.1.1. Tratamiento de fosfatación tricationica microcristalina.

La carrocería es sometida a una inmersión completa con un giro de 360° en una solución con níquel/manganeso/zinc (“trication”) diluidos en ácido fosfórico, sales de ácido clórico HClO_3 , (que contienen el cloro en estado de oxidación +V) y agua. El color de la solución en el tanque es de color verde y se utiliza principalmente para el hierro, el acero, y aleaciones de acero chapado o galvanizado.

Aplicado el tratamiento, se seca en horno a temperatura de 60°C, durante un lapso de tiempo de 180 segundos.

Las composiciones trication son superiores para los fines de adherencia de la pintura, resistencia a la corrosión y resistencia a la solubilidad en álcali, los elementos que forman la composición trication contribuyen particularmente a [101]:

- El Níquel aumenta la resistencia a la corrosión de la superficie metálica.
- El Manganeso aumenta la resistencia a los álcalis necesaria para la electrodeposición catódica de pintura, también mejora la impermeabilización en los revestimientos de superficie y protege por desgaste mecánico.
- El Zinc sirve como base adherente para posteriores capas de recubrimiento.



Figura 19. Aplicación de fosfatación tricationica microcristalina.

3.4.1.2. Cataforesis o electrodeposición catódica.

Término en inglés *electrocoating (e coat)*, técnica que consiste en aplicar pintura mediante un proceso de electrodeposición por inmersión (2 a 4 min) en una cuba con agua desionizada en un 80-90% y el restante con resina y pigmentos que proporcionan color y el brillo [102].

Durante este proceso se puede variar el grosor de la capa de pintura mediante el ajuste del voltaje aplicado, la tensión que se aplica esta comprendida entre 100 y 400 vcd, la capa producida no es conductora por lo que al alcanzar cierto grosor el efecto eléctrico decrece hasta desaparecer, se obtienen espesores de pintura de 15 a 30 μm , en la figura 20 se muestra como funciona el proceso de electrodeposición.

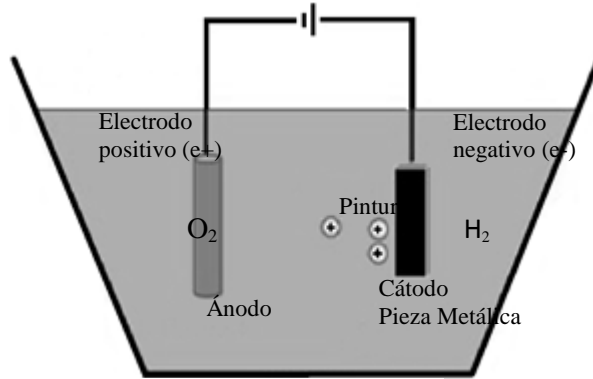


Figura 20. Esquema de una celda de electrodeposición.

En la cataforesis se emplea un polímero termoestable, que es una resina epoxi o poli-epóxido que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor.

Lavado posterior: En estos lavados con agua desionizada, se elimina de las piezas los sólidos de pintura que se hayan podido arrastrar y que se devuelven a la celda, así aumenta la eficiencia de la aplicación al haber menos desperdicio, la carrocería se seca a 180°C de temperatura durante 20 minutos [103].

En el recubrimiento resultante se aplican masillas de sellado y cera protectora de huecos, ilustrado en la figura 21, esto evita la filtración de agua en las zonas de unión de las distintas piezas que conforman la carrocería.



Figura 21. Aplicación de masillas de sellado.

Se emplean paneles insonorizantes, que disminuyen las vibraciones, reduciendo los riesgos de aparición de corrosión por fatiga y otra protección que consiste en la pulverización de protectores y anti gravillas sobre las zonas mas expuestas a erosión por rocas de dimensiones menores y gravillas: piso del vehículo, estribos, base de rueda, etc.

Otro enjuague.

3.4.1.3. Aplicación de la antichip.

Posteriormente se aplica un tratamiento de aplicación de *PVC* conocido como *antichip* [104], esta capa es aplicada por pulverizado, ver figura 22, que presenta una alta resistencia química al aceite, el agua y los combustibles. Además posee un tratamiento anti-*UV* para evitar que el material se ponga amarillo con el paso del tiempo, se cura en un horno a 140°C de temperatura durante 24 min.



Figura 22. Aplicación de la capa de *PVC* (Antichip) [105].

Al salir la carrocería del horno es llevada por una zona de control ambiental para evitar suciedad y polvo, en una línea de procesos de limpieza conjuntos se aplica un proceso de soplado a alta presión la carrocería y se realiza un suave lijado de las superficies, eliminando pequeños defectos, como partículas de suciedad o restos de productos, después, es necesario limpiar la carrocería para dejarla libre de polvo producto del lijado [106].

3.4.1.4. Aplicación del Primer.

Se aplica con el objeto de conseguir una superficie uniforme, que garantice, además, adhesión, la aplicación del primer es electrostática, se atomiza en finas gotas con carga positiva, que son atraídas por la carrocería mediante campos eléctricos, al conectar la carrocería al polo negativo.

Mediante sistemas aerográficos manuales se pintan huecos o zonas de difícil acceso para los robots, el resto es pintado por autómatas, después se seca la carrocería, a temperaturas entre 140 y 160°C, durante 20 minutos.

En algunos casos, después del secado del producto, se efectúa un suave lijado de la superficie para eliminar pequeños defectos, cuando esto ocurre es necesaria una nueva limpieza que se lleva a cabo en túneles de secado y rodillos especiales fabricados con plumas de aves (ver figura 23), que al frotar la carrocería inducen una fuerza electrostática que elimina

partículas de polvo al ser atraídas por un arco metálico cuando pasa a través de él, asegurando la limpieza total.



Figura 23. Marco electrostático utilizado para eliminar polvo [105].

Al finalizar esta primera fase o pre pintado, debe pasar a un control de calidad donde personal técnico pulirá los desperfectos que hayan podido quedar de esta serie de procesos y continuar con el proceso de pintado.

3.4.2. Segunda fase.

Las carrocerías se ordenan según el color de *primer* aplicado acorde a la pintura de acabado; esta suele aplicarse mediante sistemas electrostáticos, por la dificultad de acceso a los brazos de los robots, se complementa el proceso con aplicaciones manuales de los técnicos de pintura.



Figura 24. Aplicación de la *base coat*[105].

Los sistemas de acabado son denominados monocapa y bicapa, el número de productos que se aplica es la característica que define el nombre, primero se pintan los interiores y huecos en forma manual por un operario.

3.4.2.1. Acabado monocapa.

Se pulveriza un único producto de dos componentes (laca y catalizador) que proporciona color y brillo, para después pintar la carrocería por la parte exterior ya de forma automatizada, el espesor de la capa de color es de 45 μm .

3.4.2.2. Acabado bicapa.

Se emplean dos productos: el color con 15 μm de grosor y el transparente, con 40 μm de grosor que dará el brillo, a pesar de utilizar dos productos en estos procesos, no es necesario secar el primero (el color) para aplicar el segundo, sino que basta con la evaporación de los disolventes para poder aplicar el transparente.

En ambos acabados, después que se aplicó la última capa de recubrimiento, se debe introducir la carrocería en un horno durante diez minutos, a 160°C de temperatura.

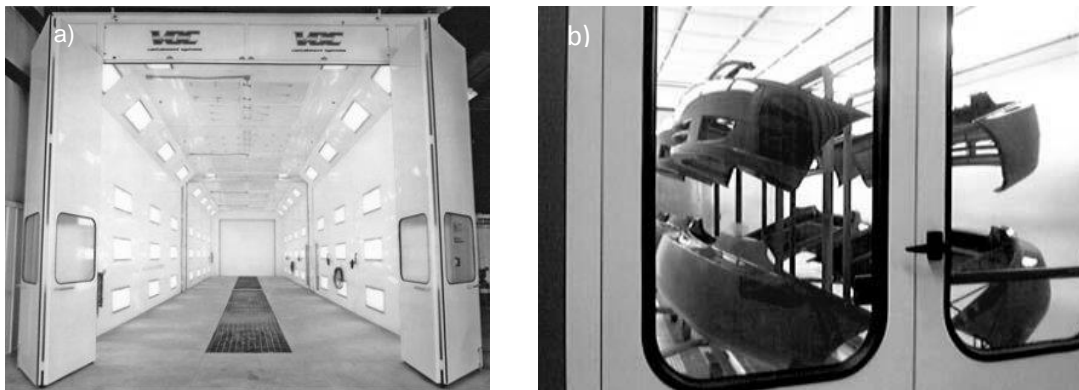


Figura 25. Horno, a) Cabina para hornear automóviles y b) Horneado de piezas automotrices [106].

De esta forma, queda completo el proceso de pintado, mediante el cual se obtiene una protección anticorrosiva que puede superar 10 años de vida útil, el espesor de todas las capas aplicadas debe estar entre 175 y 250 μm .

Cabe destacar que debido a la normativa actual, se emplean pinturas base agua, mucho menos dañinas para el medio ambiente y menos peligrosas que las pinturas de base solvente [106].

3.5. Escenarios tribológicos.

Son de interés para los acabados de pintura exterior durante la vida de servicio los siguientes escenarios tribológicos:

- Daños por impacto de rocas de dimensiones menores.

- Erosión por partículas duras, al lado inferior del cuerpo.
- Micro-abrasión en la capa de transparente *clear coat* “MAR”

3.5.1. Desgaste por impacto de rocas de dimensiones menores.

El impacto de piedra pequeña puede conducir a 4 escenarios:

1. No hay pérdida de pintura aparente o delaminación metal-polímero.
2. Pérdida de pintura sin delaminación en el límite metal-polímero.
3. Pérdida de la pintura y delaminación en el límite metal-polímero.
4. Sin pérdida de pintura, pero delaminación metal-polímero.

La pérdida física de la pintura genera una pérdida de estética que con tiempo y humedad del ambiente lleva a corromper la superficie del sustrato.



Figura 26. Remoción de pintura por picadura de partículas solidas.

La delaminación sucede si hay pérdida de la adhesión entre el sustrato y la pintura que, con el tiempo también conduce a la corrosión.

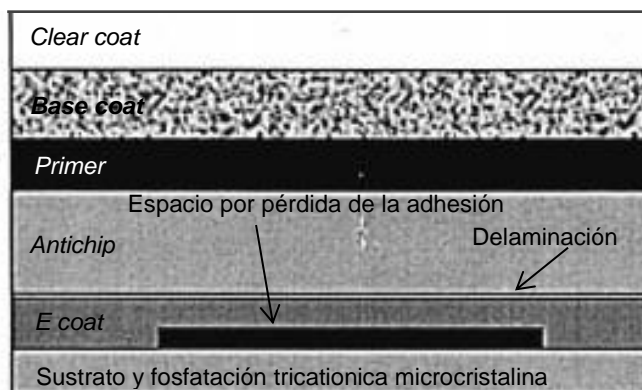


Figura 27. Delaminación sin remoción en el límite metal/polímero.

Es necesaria una técnica para la evaluación de la durabilidad por impacto de roca de dimensión menor [74].

Capítulo IV

4. Caracterización de superficies.

4.1. *Introducción a la Perfilometría.*

La perfilometría mecánica o de contacto es una técnica de análisis superficial 2 y 3D, [107] consiste en la medir el desplazamiento vertical de un palpador mientras se realiza un barrido lineal con fuerza constante sobre la superficie de una muestra.

El palpador sigue el perfil real y el transductor convierte sus desplazamientos en señales eléctricas que son procesadas por un software que grafica este y otros parámetros de acabado superficial, la realización de barridos sucesivos y paralelos permite generar un mapa tridimensional cuyo detalle depende de la velocidad de palpador [108].

4.1.1. *Texturas.*

La textura de una superficie se define en función de las características siguientes: rugosidad, ondulación, orientación y fallas [85]; ver figura 28.

4.1.1.1. *Rugosidad.*

Son pequeñas desviaciones microgeométricas con un patrón de comportamiento que depende del material y los procesos de conformación, está determinada por la cantidad y amplitud de irregularidades que conforman la superficie.

4.1.1.2. *Ondulación.*

Es resultado de la deformación del material por los procesos de manufactura y son desviaciones macrogeométricas que no siguen un patrón de comportamiento.

4.1.1.3. *Orientación.*

Es la dirección predominante de la textura superficial, y viene determinada por el método de fabricación empleado.

4.1.1.4. *Fallas.*

Son irregularidades ocasionales como grietas, ralladuras, inclusiones y otros defectos.

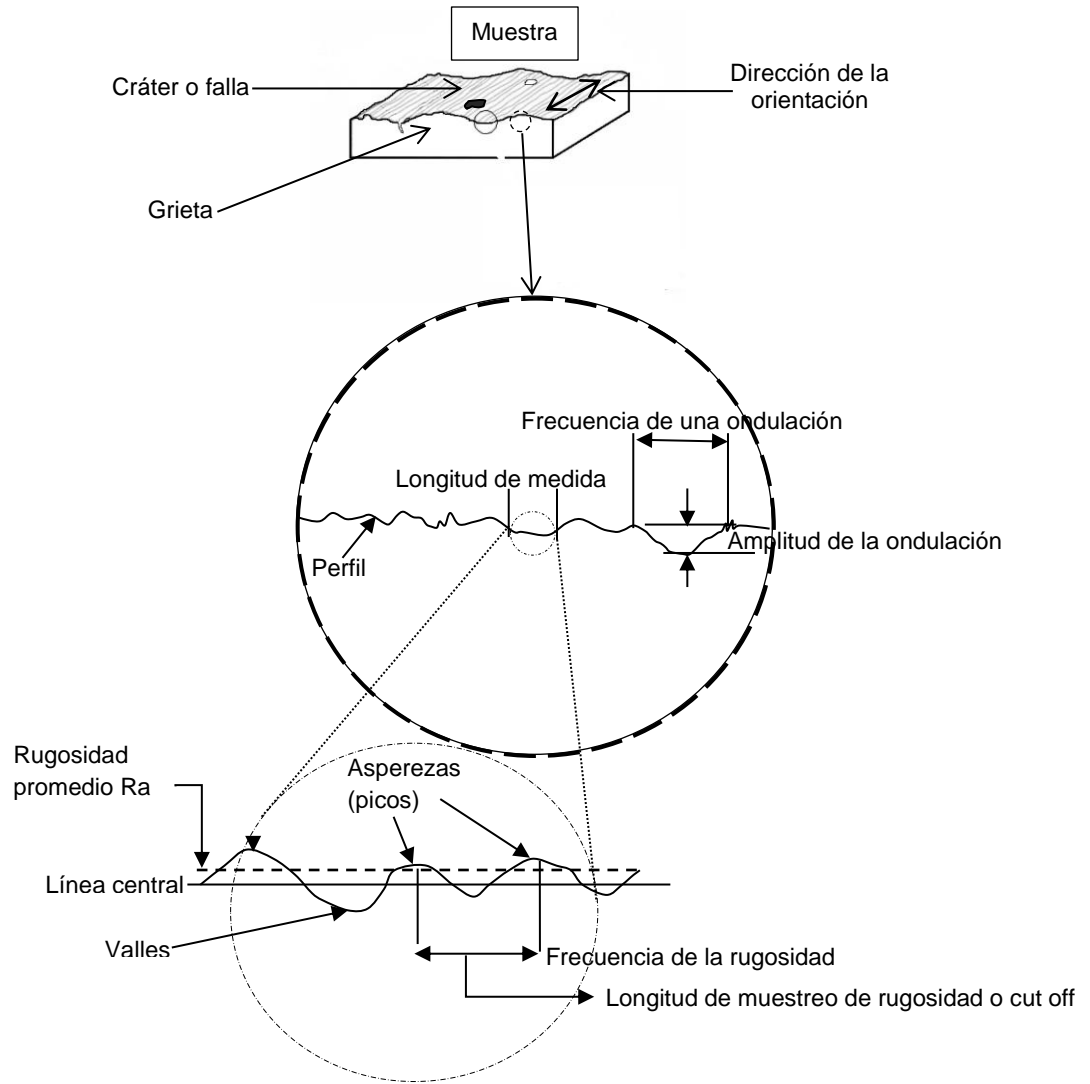


Figura 28. Esquema empleado en la medición de rugosidad.

4.1.2. Escalas de medición.

Las mediciones se realizan con escala en $\mu m Ra$ o Rz .

4.1.2.1. Escala $\mu m Rz =$ profundidad de rugosidad media.

Es la profundidad de la rugosidad media Rz y es la media aritmética de los valores absolutos de las alturas de las cinco crestas del perfil más altas y de las profundidades de los cinco valles del perfil más bajos dentro de una longitud dada [109].

El perfil, como puede observarse en la fig. 30 es una función periódica, por tanto el problema puede acotarse a un solo periodo que coincidirá con el rastro que deja un solo ciclo, en la integral se acotaran los límites a una distancia igual al avance por vuelta y por diente a_z .

$$Ra = \frac{1}{a_z} \int_0^{a_z} |y(x) - m| dx \quad (\text{Ecuación 2}).$$

Se ha obtenido la función $y(x)$ que define el perfil y su valor promedio en m . la figura 32 muestra el gráfico con las dos funciones para facilitar la comprensión del cálculo del parámetro Ra .

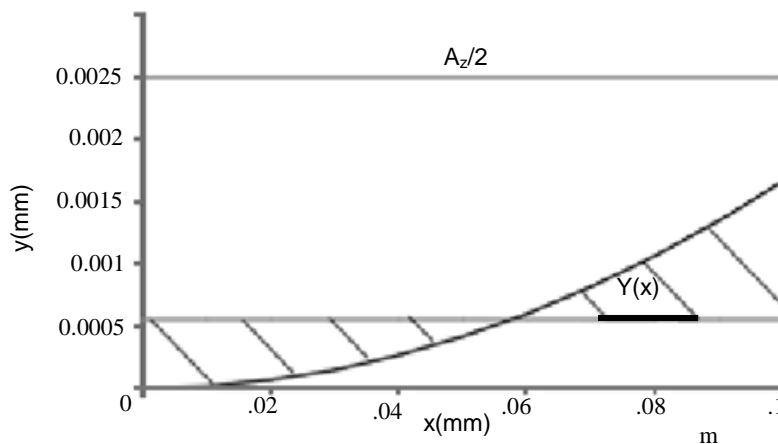


Figura 31. Área entre el perfil y línea central (m) en un tramo de longitud $a_z/2$.

El valor numérico medido es siempre menor al valor Rz obtenido en el mismo perfil de rugosidad.

El parámetro de rugosidad media (Ra) consiste en calcular el área que queda entre la función $y(x)$ y la recta m en valor absoluto, el valor promedio de estas áreas es el parámetro Ra , se muestra la grafica en la figura 32.

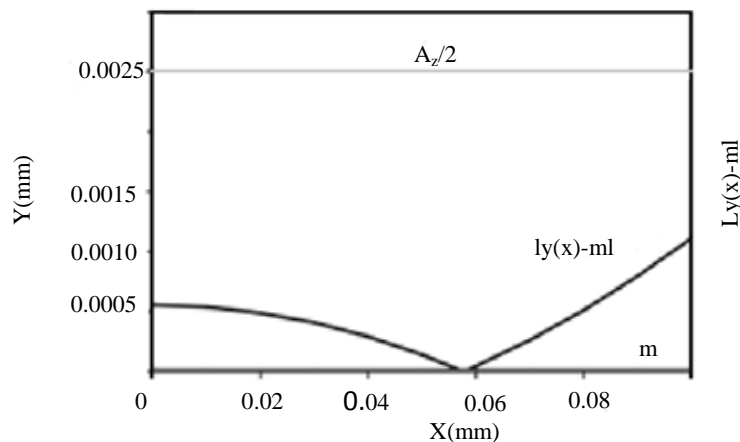


Figura 32. Área entre el perfil y línea central (m) en un tramo $a_z/2$ en valor absoluto.

4.2. Sistemas para evaluar el estado superficial.

4.2.1. Rugosímetros.

Son equipos electrónicos que miden la topografía de un material con un palpador que se mueve a una velocidad determinada y constante, la superficie del material es seguida durante su avance por los desplazamientos verticales y horizontales del palpador.

Los movimientos se transforman mediante un sensor piezoeléctrico en una señal electrónica y con un software propio del equipo se grafica el perfil, filtrando las señales (ondulación, rugosidad, fallas y orientación).

La figura 33 a) muestra un rugosímetro convencional, en 33 b) se muestra la imagen ampliada de un palpador actuando en la superficie de una pieza.

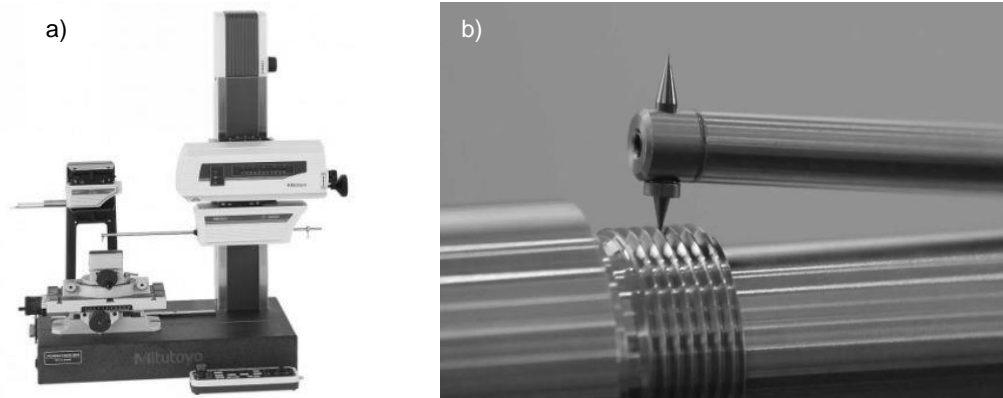


Figura 33. Equipo para medir rugosidad superficial; a) Rugosímetro, equipo que caracteriza superficies y b) Palpador del rugosímetro [110].

4.3. Microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscope SEM*).

Consiste en un barrido con un haz de electrones sobre una muestra, y, salvo que esta sea conductora, se cubre con una capa muy fina de oro o carbón para agregar propiedades de electro conducción; Un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital, (ver figura 34):

La *SEM* consigue una resolución entre 4 y 20 nm y permite realizar análisis de ensayo de composición no destructivos [111].

4.3.1. Método de funcionamiento de un SEM.

Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra, se producen interacciones entre estos y los átomos de la muestra; por otra parte, la energía perdida al impactar contra la muestra hace que otros electrones salgan despedidos, los cuales se conocen como secundarios y producen rayos X, electrones Auger, etc. También la muestra desprende una señal de rayos X

4.3.1.1. Electrones retrodispersados (e_1).

Detector de electrones retrodispersados (*BEI*) *Backscattered electron image*, con menor resolución de imagen pero con mayor contraste para obtener la topografía de la superficie.

4.3.1.2. Electrones secundarios (e_2).

Detector de electrones secundarios: (*SEI*) *Secondary electron image* con los que se obtienen imágenes en alta resolución.

4.3.1.3. Radiación electromagnética (X ray) y partículas poco significativas.

Detector de energía dispersiva (*EDS*) *Energy dispersive spectrometer* permite recibir los rayos x generados y realizar un análisis espectrográfico de la composición de la muestra.

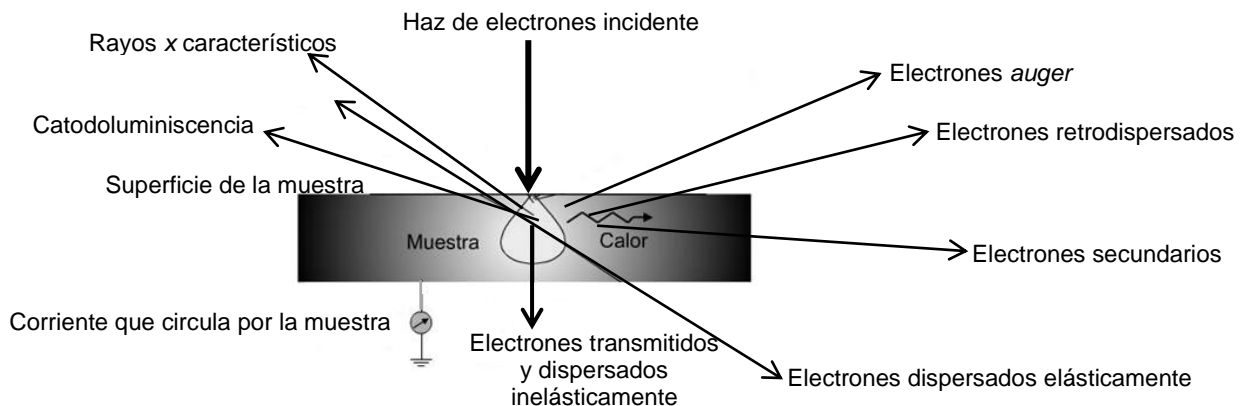


Figura 34. Señales generadas por un haz de electrones en un microscopio electrónico de barrido.

4.4. Termografía.

Del vocablo griego *Therm* que significa calor y *graph* Gráfico, la termografía es la aplicación de lecturas de calor con infrarrojos para medir emisiones de calor y localizar funciones anormales en la superficie de un mecanismo o cuerpo [112].

- El calor se puede definir como una forma de energía creada por los movimientos moleculares de un objeto, es una medida de la energía cinética total de todas las moléculas en los objetos.
- Temperatura es una medida de la energía térmica contenida por un objeto; el grado de picor o frío de un objeto medible mediante cualquier escala relativa, es una medida de la cantidad de calor presente en un cuerpo.

4.4.1. Sistemas portátiles de medición de imágenes térmicas.

Ofrecen imágenes de medición de calor almacenadas en software y que al análisis se convierten en preaviso de problemas, la digitalización infrarroja es una técnica no destructiva y compara la distribución de temperatura de la superficie en un área amplia.

Se hace inspección con una cámara termográfica para identificar componentes que están operando a una temperatura más alta a la normal, y es esto un preaviso de averías mecánicas o eléctricas de los componentes, la cámara infrarroja no emite algo, detecta energía infrarroja emitida por un objeto de una manera pasiva, la figura 36 muestra un esquema de funcionamiento de una cámara termográfica.

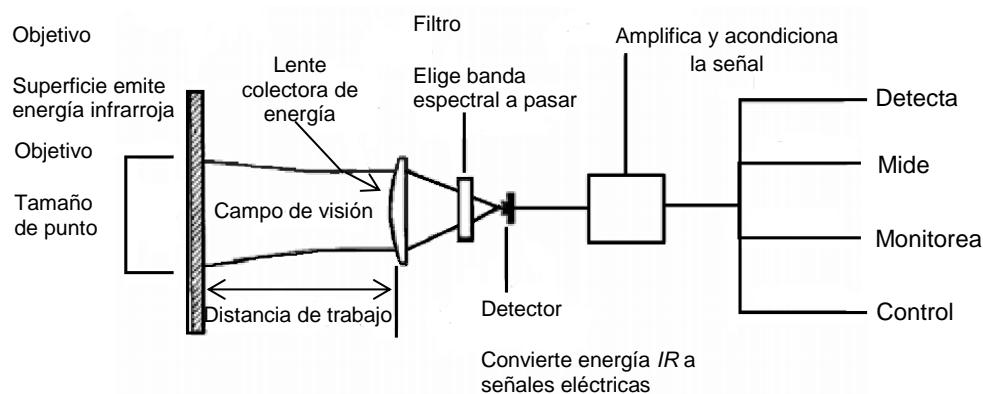


Figura 35. Esquema de funcionamiento de una cámara termográfica.

4.4.2. Transferencia de calor.

La transferencia de calor se lleva a cabo por tres fenómenos que son:

- *Radiación.*
- *Convección y*
- *Conducción.*

4.4.2.1. Transferencia de calor por radiación.

La radiación térmica es la velocidad a la que la energía es emitida por la materia como resultado de su temperatura finita, esta radiación es emitida por todas las formas de materia por encima de $0^\circ K$, y es el resultado de las oscilaciones de electrones excitados térmicamente o transiciones dentro de la materia.

La radiación se emite desde un objeto en una distancia de aproximadamente $1 \mu m$ de una superficie expuesta, por esta razón la radiación térmica es vista como un fenómeno de superficie [113].

Hay dos teorías que describen cómo se propaga la radiación térmica de la superficie de un objeto:

- La radiación se considera como la propagación de las ondas electromagnéticas.
- Considera a la radiación como la propagación de un conjunto de partículas llamadas fotones o cuantos.

En cualquier caso, la radiación se puede expresar en términos de las propiedades estándar de la frecuencia de onda; (unidades s^{-1}) cm. de longitud de onda, las dos teorías consideran que se propaga en un medio determinado [112].

4.4.2.2. Transferencia de calor por conducción.

La transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas inicia de partículas de alta energía y pasa a partículas de baja energía y la transferencia de calor a través o entre dos sólidos [113].

4.4.2.3. Transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor a través de un fluido por convección natural implica la fuerza de gravedad o ventilación forzada que implica un mecanismo como un ventilador o una bomba.

La temperatura se mide en diversas escalas, la figura 36 muestra una comparación de ellas y sus nombres.

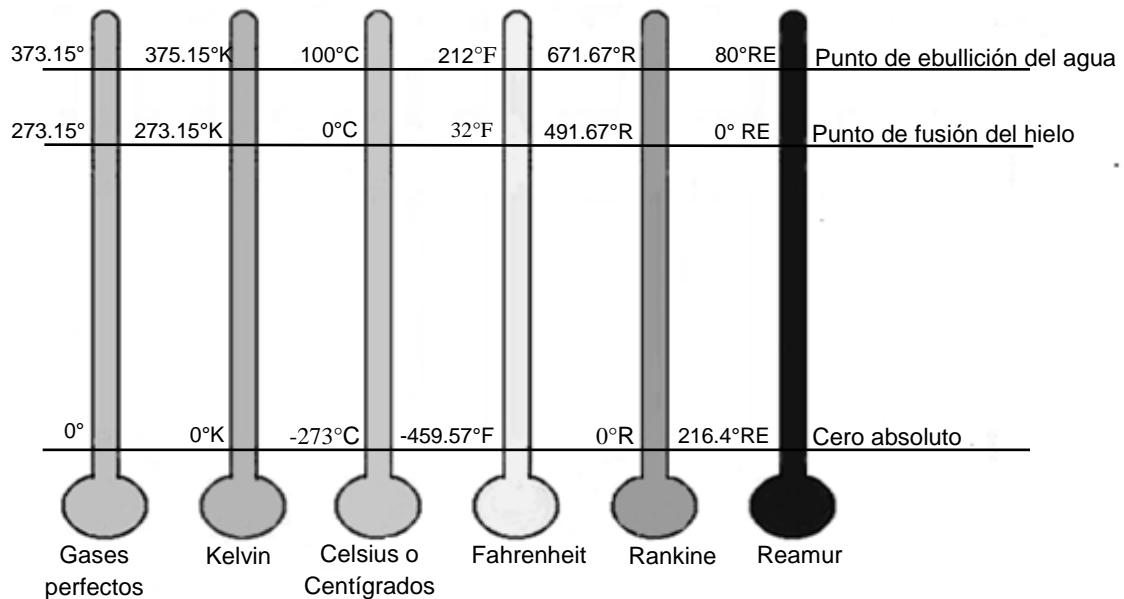


Figura 36. Escalas de temperatura [114].

4.4.3. Criterios sobre la termografía.

- Ley de Kirchoff: $T + E + R = 1$. Energía emitida + transmisión de energía + energía reflejada = 1.
- Emisividad. es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura con su entorno Un emisor perfecto se conoce como un cuerpo Negro y $\mathcal{E} = 1$, por lo que los cuerpos en la naturaleza son los cuerpos de color y tienen un $\mathcal{E} < 1$.
- El coeficiente de emisividad (ϵ), es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro
- Reflectancia es la cantidad de luz reflejada por un objeto. P.E: Cinta de aluminio $R = 0,98$ $\mathcal{E} = 0,02$ o un espejo es un buen reflector [115].
- Transmitancia Es el calor transmitido de un objeto a la cámara.
- Delta T es una diferencia de temperatura.

4.5. Métodos de obtención del valor de dureza de un material.

4.5.1. Indentación.

Dureza: Valor mínimo de la presión por debajo de un indentador esférico necesario para producir una deformación plástica en el centro de la zona de contacto.

Los métodos convencionales de obtención del valor de dureza de un material se basan en la medida óptica de la huella residual sobre una muestra después de aplicarle una carga normal por medio de un indentador, el valor de dureza para dicho material se calcula dividiendo la carga aplicada por el área de la huella residual.

Un sistema de indentación mide el movimiento de una punta de diamante en contacto con una superficie [116].

4.5.2. Nanoindentación.

Una medida de indentación se convierte en nanoindentación cuando el tamaño de la huella residual es pequeña para ser resuelta con precisión con microscopía óptica, esto sucede en medidas de dureza de capas finas donde es necesario usar cargas muy bajas, (decimas de mN).

Al hacer una medida de nanoindentación se aplica una carga incremental dinámica y se registra la penetración del diamante dentro de la superficie, este método permite medir las propiedades mecánicas a partir de los datos registrados en la indentación (carga – profundidad de la indentación) sin necesidad de evaluar la impresión residual como en los métodos convencionales.

El nanoindentador debe penetrar máximo 10% del espesor de una capa para evitar la influencia del sustrato en el valor de dureza obtenido.

4.5.2.1. Indentador Berkovich.

Es un tipo de nanoindentador para probar la dureza de un material, es una pirámide de tres lados con un perfil plano, simétricos y un ángulo total incluido de 142,3 grados y un ángulo medio de 65,35 grados, medido desde el eje a uno de los pisos de la pirámide (ver figura 37).

La forma de la punta fue inventado por el científico ruso *E. S. Berkovich* en la URSS en 1950 [117].

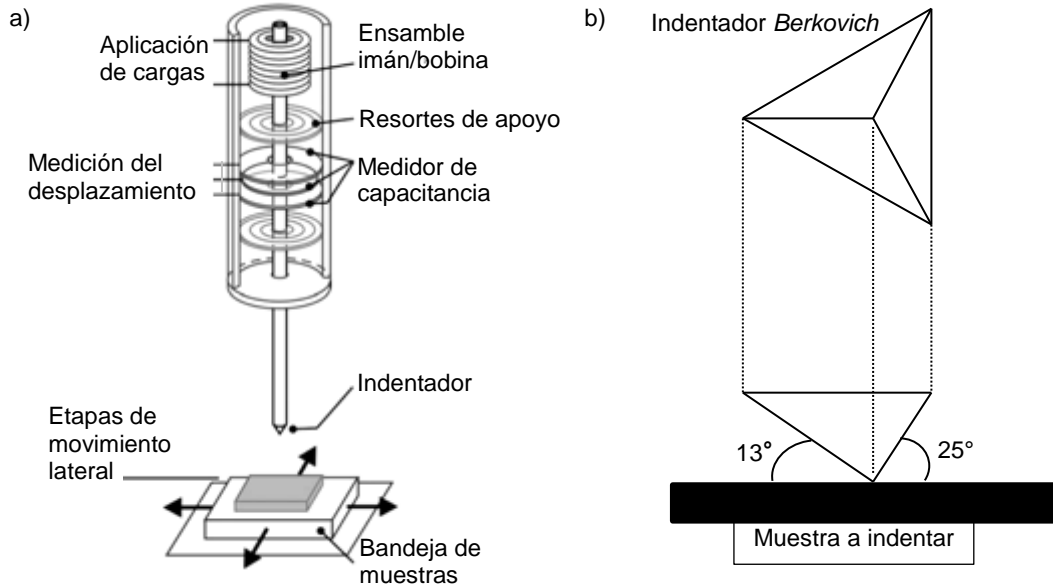


Figura 37. (a) Diagrama del sistema utilizado en un nanoindentador; La fuerza aplicada en el indentador se genera a través de una bobina que se encuentra dentro de un imán circular. El sistema de desplazamiento de detección consiste en un capacitor de tres placas (discos circulares). (b) Punta *Berkovich*: Una pirámide con un triángulo equilátero como área de la base [118].

Se utiliza para medir materiales a granel y películas superiores a 100 nanómetros ($3,9 \times 10^{-6}$) in de espesor.

Un sistema de nanoindentador Berkovich admite un margen de cargas de 0-250 mN y profundidades de 0-.50 mm.

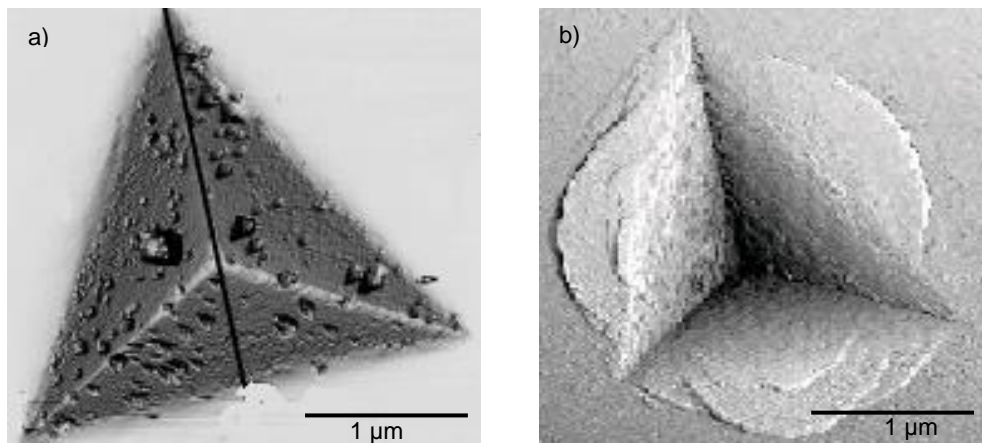


Figura 38. Imágenes de nanoindentación mediante método Berkovich obtenidas con un *AFM* modo altura-contorno.; a) Imagen de la punta de penetración de un indentador Berkovich y b) huella residual en una muestra de platino policristalino 99.9999% de pureza sometida a una indentación Berkovich con carga de 30 mN [119].

La muestra se manipula accionando tres micrómetros motorizados de precisión con recorrido total de 25 mm en los tres ejes coordenados.

El proceso de medida se hace de forma completamente automatizada mediante una PC y un paquete de software que permite la programación de todos los parámetros de control, calibración, presentación e impresión de resultados.

4.6. Definición de la elipse.

Una elipse es el lugar geométrico de todos los puntos P del plano, tales que la suma de sus distancias a dos puntos fijos en el plano es constante. Los puntos fijos F_1 y F_2 se llaman focos, se muestra gráficamente en la figura 39:

Con relación a la figura, el segmento de recta $\overline{V_2V_1}$ que pasa por los focos es el eje mayor, la mediatriz $\overline{B_2B_1}$ del eje mayor es el eje menor, cada extremo del eje mayor V_1 y V_2 se llama vértice, el punto medio del segmento $\overline{F_2F_1}$ se llama centro de la elipse. La distancia del centro a cada vértice se llama semieje mayor y la distancia del centro a cada extremo del eje menor se conoce como semieje menor.

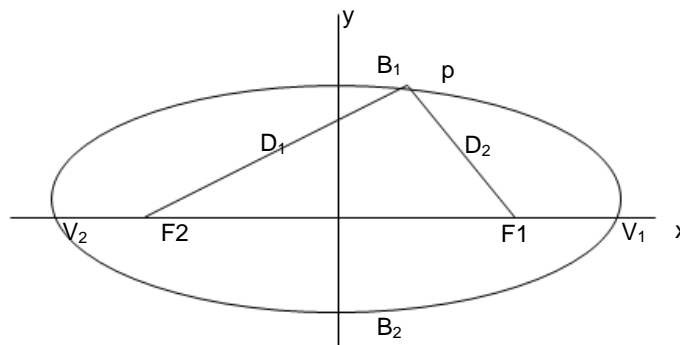


Figura 39. Definición gráfica de la elipse.

4.6.1. Ecuación canónica de la elipse.

La ecuación de la elipse cuando su centro se halla en $(0,0)$ del eje de coordenadas, se conoce como ecuación canónica de la elipse.

Una elipse tiene sus focos situados en $(-4, 0)$ y $(4, 0)$. La suma de distancias desde estos puntos a un punto de la elipse es 9. La ecuación de la elipse es:

En este caso, el centro se halla en $C(h, k)$ y la ecuación de la elipse será:

$$\frac{(x-h)^2}{a^2} + \frac{(y-k)^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para hallar la ecuación de una elipse con centro fuera del origen de coordenadas se debe transportar al origen: ¿qué ecuación tiene una elipse con centro en el punto $C(3,2)$, un foco en $F(6,2)$ y $A(8,2)$:

Respuesta = $\frac{(x-3)^2}{25} + \frac{(y-2)^2}{16} = 1$

Solución gráfica:

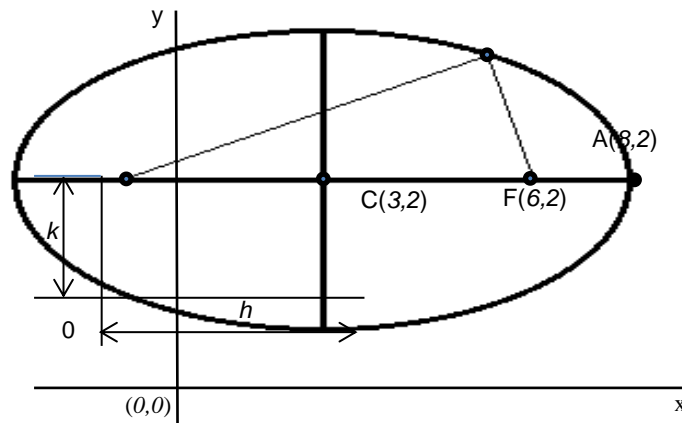


Figura 41. Representación gráfica de la solución.

Distancia focal.

$$c = 6 - 3 = 3,$$

semieje mayor.

$$a = 8 - 3 = 5.$$

semieje *menor*.

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} = \sqrt{25 - 9} = 4$$

Trasladamos el centro de esta elipse al origen de coordenadas y obtenemos:

$$\frac{(x-3)^2}{5^2} + \frac{(y-2)^2}{4^2} = 1$$

4.6.3. Ecuación general de la elipse.

Una ecuación como $Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0$ se refiere a la ecuación general de la elipse, la obtenemos de un modo sencillo basándonos en la ecuación de la elipse con centro en (x_0, y_0) y no en el origen de coordenadas, escribimos del modo siguiente:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Ecuación 5}).$$

$$b^2(x - x_0)^2 + a^2(y - y_0)^2 = a^2b^2$$

$$b^2(x^2 - 2xx_0 + x_0^2) + a^2(y^2 - 2yy_0 + y_0^2) = a^2b^2$$

Haciendo operaciones tenemos:

$$b^2x^2 - 2b^2xx_0 + b^2x_0^2 + a^2y^2 - 2a^2yy_0 + a^2y_0^2 = a^2b^2$$

Ordenamos:

$$b^2x^2 + a^2y^2 - 2b^2xx_0 - 2a^2yy_0 + b^2x_0^2 + a^2y_0^2 - a^2b^2 = 0 \quad (I)$$

Damos los valores siguientes a:

$$\begin{aligned} b^2 &= A \\ a^2 &= B \\ -2b^2x_0 &= C \\ -2a^2y_0 &= D \\ b^2x_0^2 + a^2y_0^2 - a^2b^2 &= E \end{aligned}$$

Sustituyendo en (I) obtenemos:

$$Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (\text{Ecuación 6}).$$

Es la ecuación general de la elipse.

Observa que los coeficientes de A y B tienen el mismo signo [120].

4.7. El cono truncado o tronco de cono.

Es un cuerpo geométrico que resulta al cortar un cono por un plano paralelo a la base y separar la parte que contiene al vértice, los elementos del cono truncado son:

- La sección determinada por el corte es la base menor (r).
- La altura perpendicularmente las dos bases (h).

- Los radios son los radios de sus bases (R y r).
- La generatriz es el segmento que une dos puntos del borde de las dos bases (g) [127], en la figura 42 se muestran sus características.

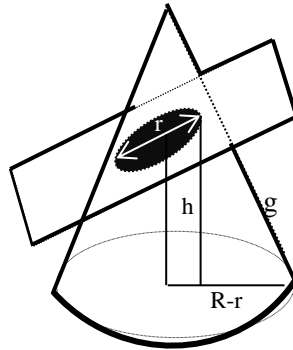


Figura 42. Área y elementos de un cono truncado.

4.7.1. Ecuación del cono truncado.

Obtenemos la generatriz del cono truncado aplicando el teorema de Pitágoras en el triángulo sombreado:

$$g^2 = h^2 + (R-r)^2$$

Donde:

g = generatriz

h = altura

R = radio mayor

r = radio menor

$$G = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \quad \text{(Ecuación 7).}$$

Área lateral de un cono truncado.

A_L = área lateral.

$$A_L = \pi (R + r) * g. \quad \text{(Ecuación 8).}$$

Área de un cono truncado.

A_t = área total del cono truncado.

$$A_t = \pi [G (R + r) + R^2 + r^2] \quad \text{(Ecuación 9).}$$

Volumen de un cono truncado.

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + r^2 + R r).$$

(Ecuación 10).

$$1 \text{ micra} = 1 \mu\text{m} = 0.000001 \text{ m} = 0.001 \text{ mm}.$$

Capítulo V

5. Experimentación.

5.1. Especímenes.

Se obtuvo un cofre automotriz procedente de un automóvil nuevo, este con un grosor de 0.975 mm y rugosidad superficial promedio de 10 μm *RA* del lado con recubrimiento, se cortaron veintidós muestras de 50 mm por 50 mm cada una.

Los especímenes estuvieron conformados por seis capas de recubrimiento con los siguientes grosores nominales, situado de la capa exterior hacia dentro se encuentran las siguientes capas: *clear coat* de 50 μm , *base coat* con espesor de 25 μm , *primer* de 25 μm , *antichip* de 25 μm , *ecoat* de 25 μm y por último *sheet steel* de 825 μm ver la fig. 43.

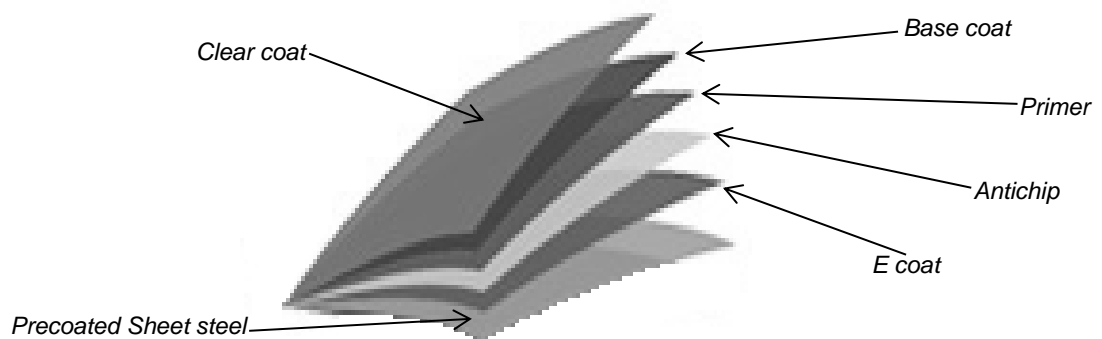


Figura 43. Ilustración de las películas de recubrimientos de la pintura automotriz.

5.2. Aparato de prueba.

El probador de blasteo para ceniza volcánica y arena sílica fue constituido por un compresor que generó un flujo de aire. Este fue almacenado en un recipiente de alta presión con una presión interna en el rango de 0.620 a 0.896 MPa.

El recipiente de alta presión fue controlado por una unidad de mantenimiento neumática, con una válvula automática drenadora de condensados, válvula de control de presión y un manómetro manual que permitió regular la presión de alimentación del pulverizador.

La unidad controladora de presión tuvo como función regular el paso de flujo de aire y se graduó para mantener una presión de 3.447 MPa.

El flujo de aire de alta presión fue mezclado con partículas solidas de ceniza volcánica o arena sílica en un recipiente. Fue regulado el mezclado de partículas solidas $< 100 \mu m$ con un flujo de aire presurizado y haciendo vibrar el recipiente, se entrego a través del pulverizador una tasa de flujo abrasivo de $0.3 \text{ g/min} \pm 10\%$, ver figura 44.

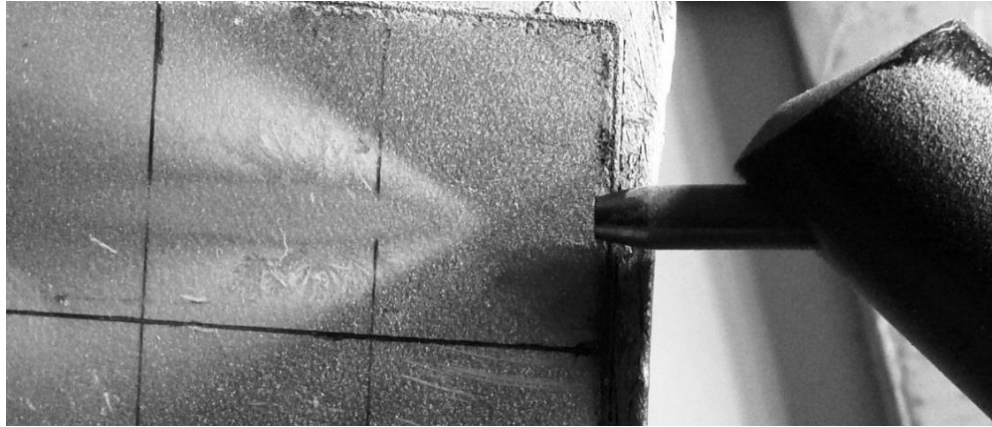


Figura 44. Boquilla de flujo de aire mezclado con ceniza volcánica realizando una prueba.

Un brazo mecánico se encargo de dirigir al pulverizador para lanzar la mezcla a la placa recubierta con pintura automotriz usando de un eje de accionamiento que sujetó los extremos de los especímenes, controlando su posicionamiento a diferentes ángulos.

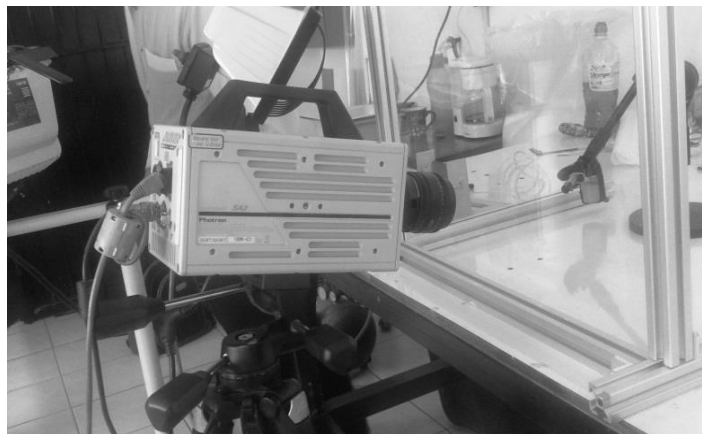


Figura 45. Cámara de alta velocidad para obtener fotografías de las pruebas.

Una celda de carga censó las fuerzas de impacto generadas por el flujo y que, reportadas en una PC, mostraron uniformidad de acuerdo al ángulo de impacto.

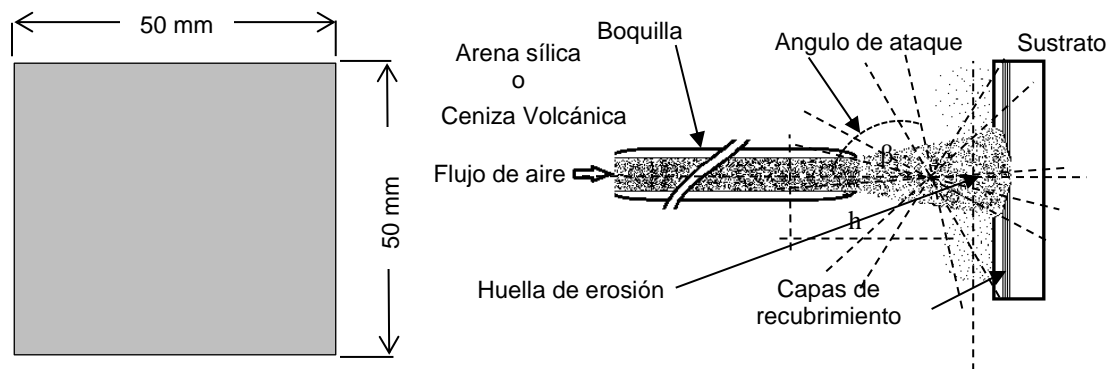


Fig. 46. El probador para el blasteo con ceniza volcánica y arena sílica; Boquilla de blasteo.

5.3 Condiciones de prueba.

Las pruebas se desarrollaron en una habitación a 20°C, con un porcentaje de humedad de 62%, con los siguientes parámetros:

Tabla 3. Parámetros utilizados durante las pruebas con ceniza volcánica y/o arena sílica.

Parámetro	Unidades
Especímenes	50 mm x 50 mm
Grosor de placa	0.975 mm
Grosor de <i>clear coat</i>	50 μm
Grosor de <i>base coat</i>	25 μm
Grosor de <i>primer</i>	25 μm
Grosor de <i>antichip</i>	25 μm
Grosor de <i>e coat</i>	25 μm
Grosor de <i>sheet Steel</i>	825 μm
Presión de impacto	0.150412 kPa
Fuerza	2.941995 mN
Área	19,559517 mm ²
Distancia de la boquilla a la superficie	10 mm
Ángulos de ataque	10, 20, 30, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90
Velocidad	27.5 \pm 0.5 m/s
Ceniza consumida por huella	3 gr \pm 10 % = 2.2 ml \pm 10 %
Presión de salida del compresor	3.4473795434 kPa
Densidad de la ceniza	1360 kg/m ³
Tamaño de grano de la ceniza	\leq 100 μm
Diámetro de la boquilla	1mm.
Tasa de flujo abrasivo	0.3 \pm 10 % gr/min = 0.22 ml \pm 10 %
Tiempo de prueba	600 s



Figura 47. Boquilla para realizar ataque con ceniza volcánica y arena sílica.

5.4. Procedimiento de prueba.

El análisis del tamaño de partículas por unidad de área fue realizado con microscopía electrónica de barrido (*SEM*) y el análisis generalizado y puntual con *EDS* (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*).

Estas técnicas determinaron los elementos químicos contenidos en la micrografía.

La metrología de las partículas de la micrografía provenientes de la ceniza volcánica utilizó como referencia la escala patrón de la micrografía con precisión de cienmilésimas de micra y fue tratada con los software: *Photoshop* y *Picture Style* para resaltar la nitidez, conversión de colores a escala de grises y definición de bordes de frontera.

Después de que fue editada la micrografía y localizadas las partículas en la escala de grises, esta fue insertada como un archivo al software *Digital* que identificó con una máscara color verde las partículas del mismo elemento químico.

5.4.1. Métodos de prueba con ceniza volcánica.

Las pruebas con ceniza volcánica (100) en especímenes recubiertos con pintura automotriz se realizaron en ángulos de ataque a 90, 80, 70, 60, 50, 45, 40, 30, 20 y 10 grados. Para cada ángulo de inclinación fueron llevadas a cabo 10 pruebas obteniendo huellas de desgaste por cavitación con partícula sólida.

Estas fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido (*SEM*). Los diámetros mayor y menor fueron medidos en una micrografía a lo largo y ancho de las huellas de desgaste en las diferentes capas de recubrimientos dañadas donde coincidió el final de una con el inicio de la subsecuente.

Se utilizó para la metrología el software *Digital* con una precisión de hasta diezmilésimas de micra y para medir la profundidad de las huellas y graficar los perfiles de desgaste se usó un equipo de perfilometría.

La dureza promedio por capa de recubrimiento de pintura automotriz fue medida con pruebas de nanoindentación *Berkovich* (*indentation tester probes Berkovich*) sobre las áreas descubiertas de las huellas de desgaste propicias para la microscopía.

La fotografía térmica fue utilizada para analizar el gradiente de temperatura sobre las huellas de desgaste y las partículas expulsadas durante el impacto.

Los daños post impacto generados por partículas de ceniza volcánica sobre áreas circundantes a las huellas de desgaste fueron evaluados para la condición de mayor drasticidad como una función de la temperatura.

5.4.2. Métodos de prueba con arena sílica.

Fueron desarrolladas 10 pruebas atacando con arena sílica los especímenes recubiertos con pintura automotriz fue utilizada la misma metodología para los especímenes atacados con ceniza volcánica. Una prueba para cada ángulo de ataque con arena sílica sirvió de referencia para evaluar las huellas de desgaste generadas con ceniza volcánica.

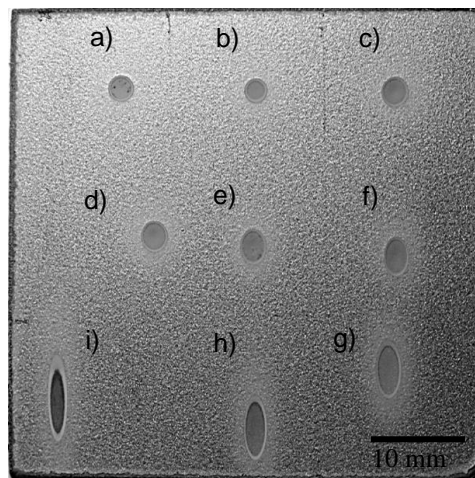


Figura 48. Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación de un espécimen recubiertos con pintura automotriz usando arena sílica a diferentes ángulos de ataque; a) 90°, b) 80°, c) 70°, d) 60°, e) 50° f) 40°, g) 30°, h) 20°, i) 10°.

5.5. Resultado de las pruebas.

La figura 49 en a); Muestra una micrografía de la ceniza volcánica y b); Un análisis generalizado *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)* de la composición química de la misma.

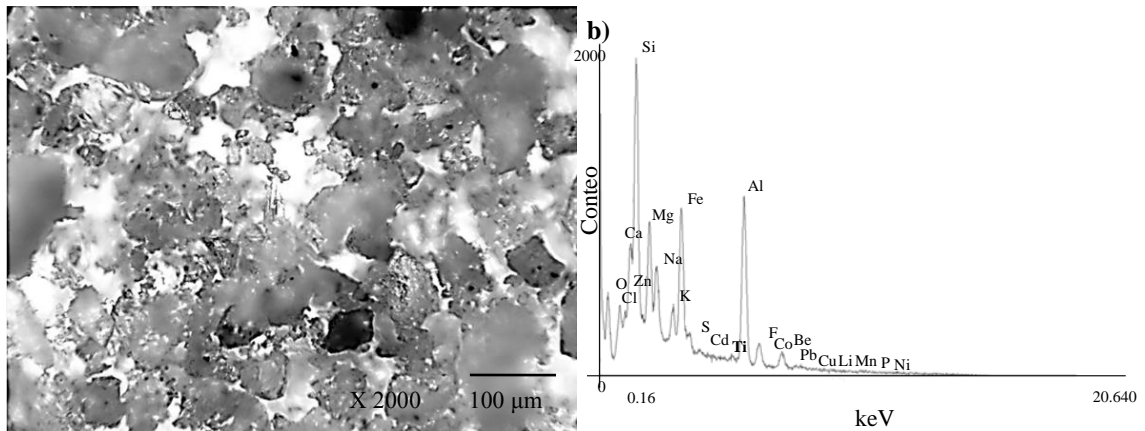


Figura 49. Ceniza volcánica; a) Micrografía, b) Análisis generalizado de EDS.

La figura 50 en a) muestra una partícula atravesando el umbral de la boquilla, b) la trayectoria que siguieron las partículas de ceniza volcánica dentro de la boquilla de blasteo con un diámetro interno de 1mm y en c) como fueron propulsadas formando al salir la forma de un cono truncado.

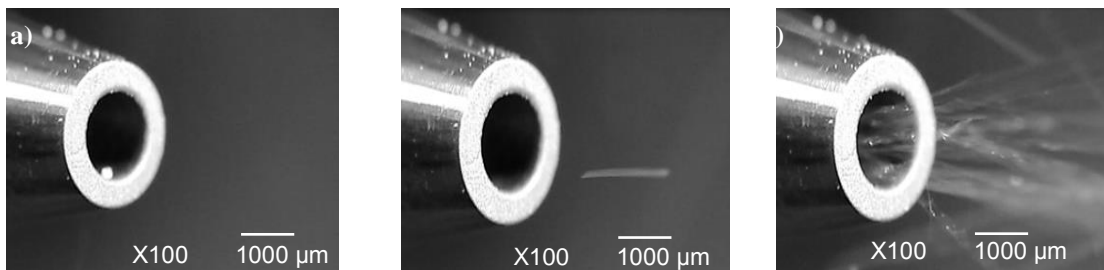


Figura 50. Partículas de ceniza volcánica $\leq 100 \mu\text{m}$; a) Expulsión, b) Trayectoria, c) Blasteo con ceniza volcánica.

Los nano-ensayos de dureza de los recubrimientos de la pintura automotriz fueron utilizando pruebas *Berkovich* y reportaron una indentación instrumental (*HIT*) promedio para el *clear coat* de 0.092 GPa, *base coat* 0.058 GPa, *primer* 0.0066 GPa, *antichip* 0.072 GPa, e *coat* 0.069 GPa y por último la *sheet steel* con 2.121 GPa.

Las siguientes figuras muestran las huellas de desgaste debido a erosión por cavitación de recubrimientos de pintura automotrices, se aprecia

el desgaste generado a las capas de *clear coat*, *base coat*, *primer*, *antichip*, *e coat* y la chapa de acero.

Las huellas de desgaste fueron circulares cuando fueron atacadas a 90° y estas tienden a una forma elíptica al reducir el ángulo de impacto.

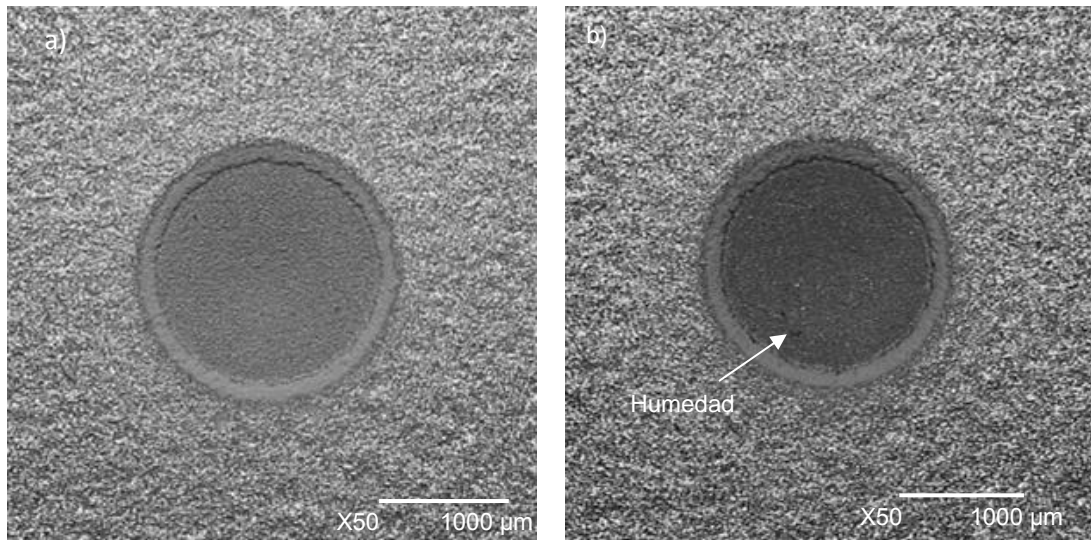


Figura 51. Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 90° y b) 80° .

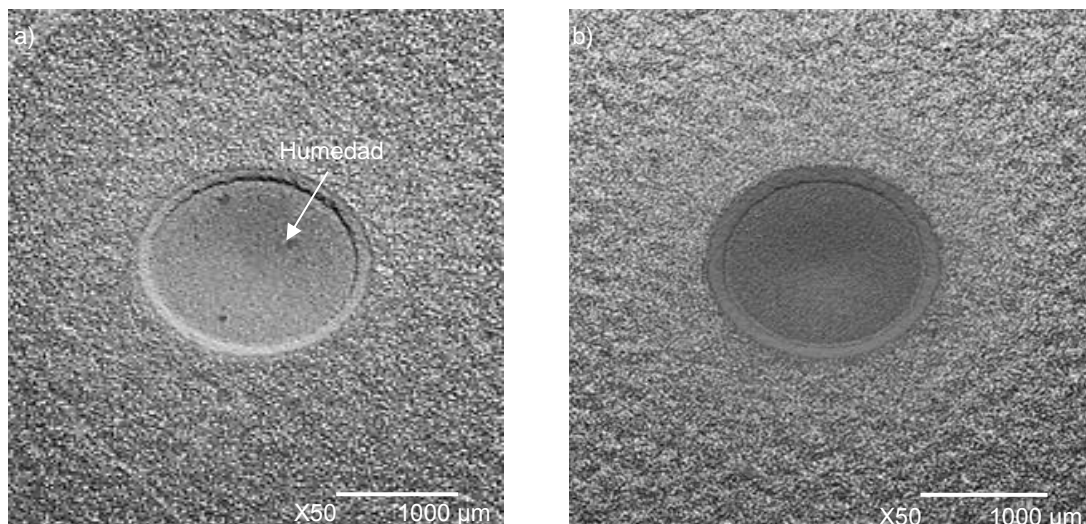


Figura 52. Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 70° y b) 60° .

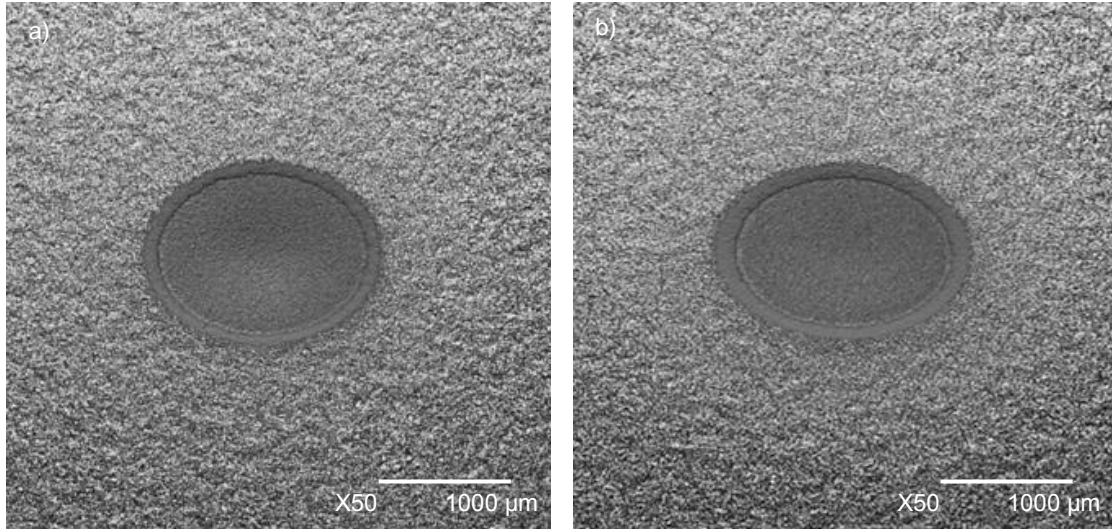


Figura 53. Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 50 y b) 45°.

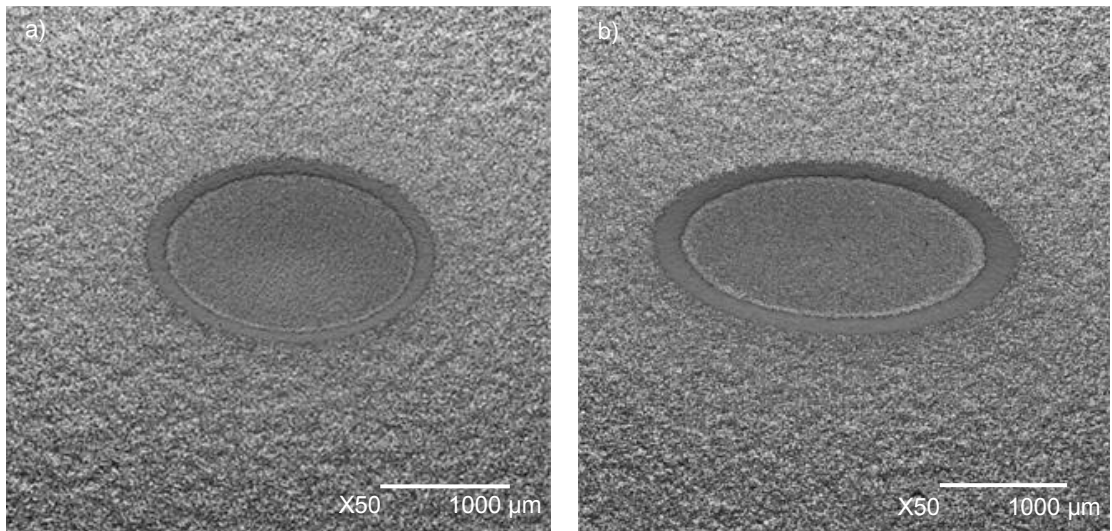


Figura 54. Huellas de desgaste debido a erosión por cavitación en especímenes recubiertos con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulos de ataque de a) 40 y b) 30°.

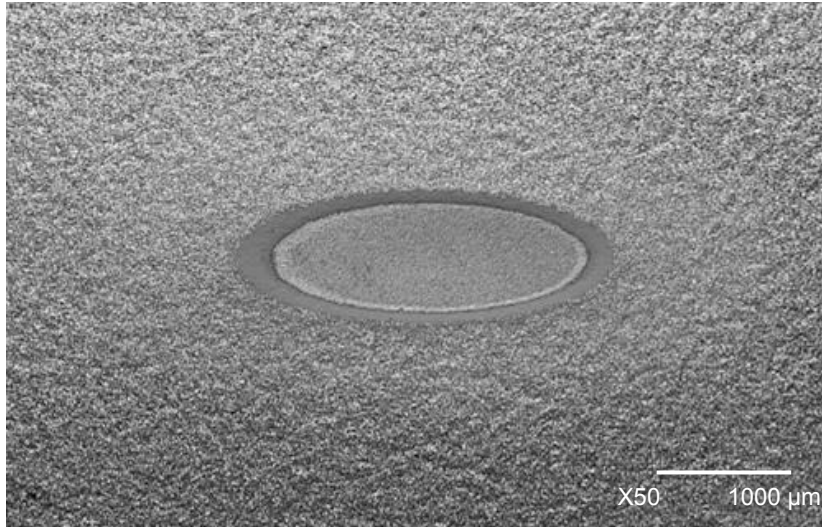


Figura 55. Huella de desgaste debido a erosión por cavitación de espécimen recubierto con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulo de ataque de 20°.

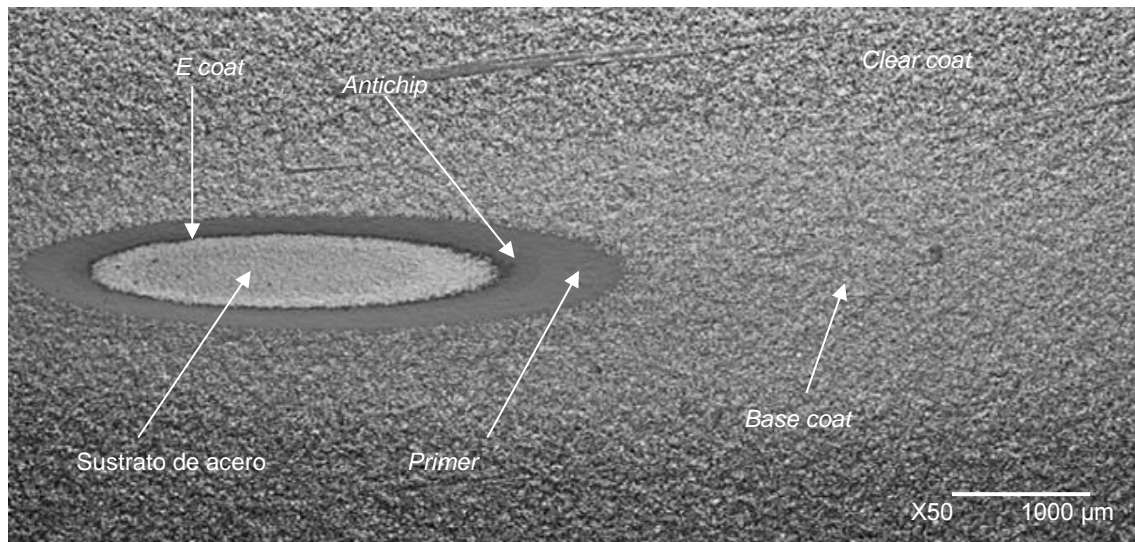


Figura 56. Huella de desgaste debido a erosión por cavitación de espécimen recubierto con pintura automotriz usando ceniza volcánica con ángulo de ataque de 10°.

Posteriormente la parte de las huellas de desgaste con mayor profundidad y mayor área descubierta del sustrato fue expuesta a lluvia acida, salinidad del agua, agentes químicos para la limpieza de la carrocería del automóvil y al medio ambiente húmedo lo que generó corrosión.

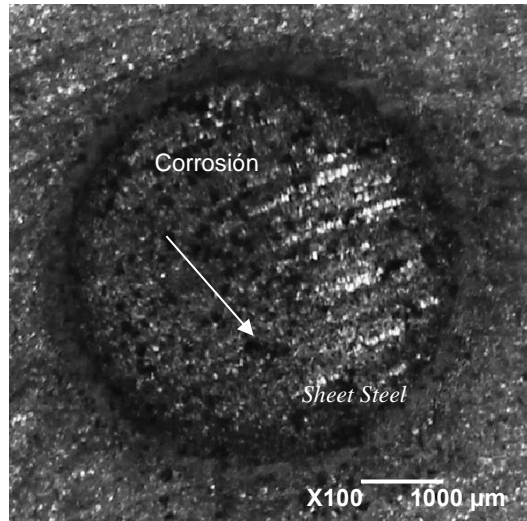
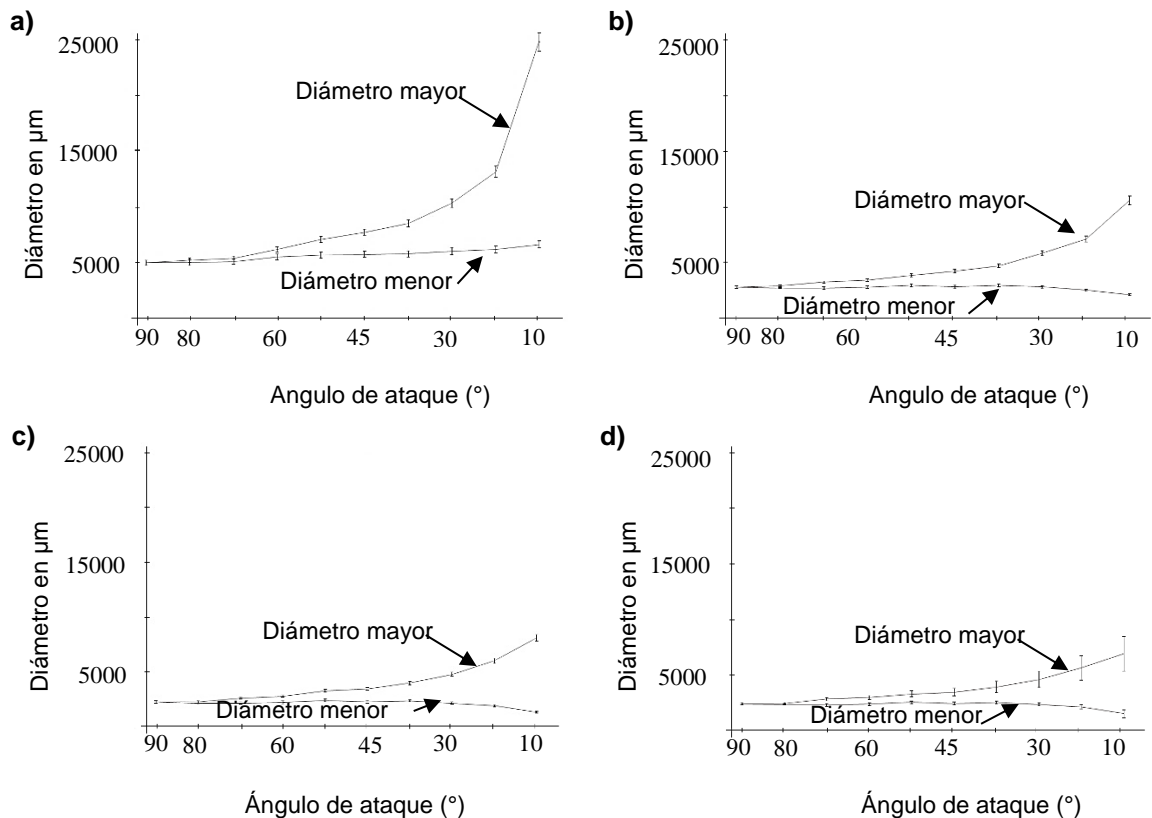


Figura 57. Formación de corrosión actuando en la mayor parte de la superficie de la huella y en el recubrimiento.

La figura 58 presenta los diámetros promedio de las huellas de desgaste de erosión por cavitación de los recubrimientos de pintura automotriz.

Las curvas de los diámetros mayor y menor fueron prolongadas, los ángulos de ataque tendieron al paralelismo con la superficie cubierta con pintura automotriz.



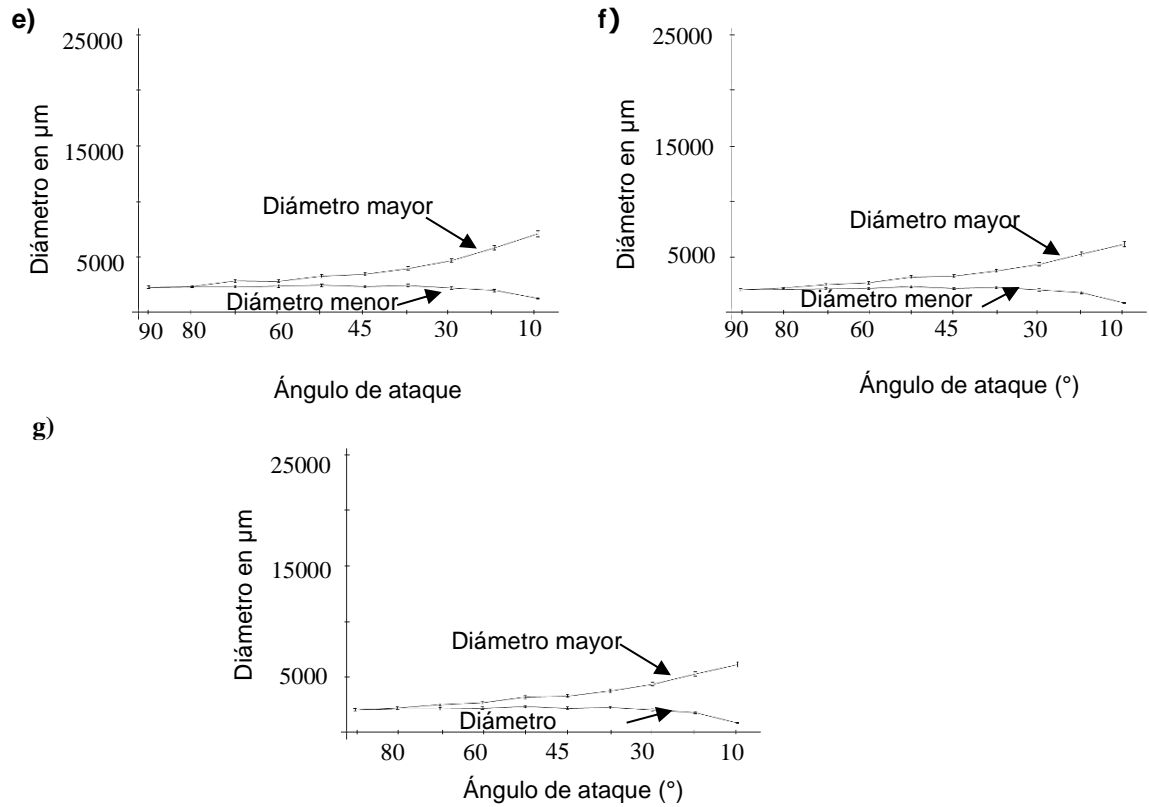


Figura 58. Diámetros promedio de las huellas de desgaste por cavitación de las capas de pintura automotriz; a) *clear coat*, b) *base coat*, c) *primer*, d) *antichip*, e) *e coat*, f) sustrato de acero, g) Daño al sustrato.

Una cámara termografica mostró que el impacto de partículas de ceniza volcánica sobre la superficie generó un incremento de temperatura de 4.3°C en la huella de desgaste, ver figura 59.

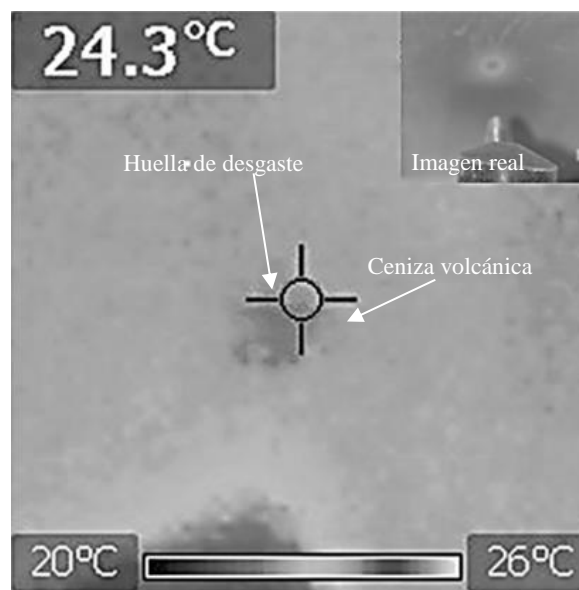


Figura 59. Imagen tomada con la cámara termografica Flirt.

La figura 60 muestra la rugosidad del perfil en el diámetro de la huella formando una figura simétrica con mayor profundidad de desgaste en el centro cuando fue atacado a 90°.

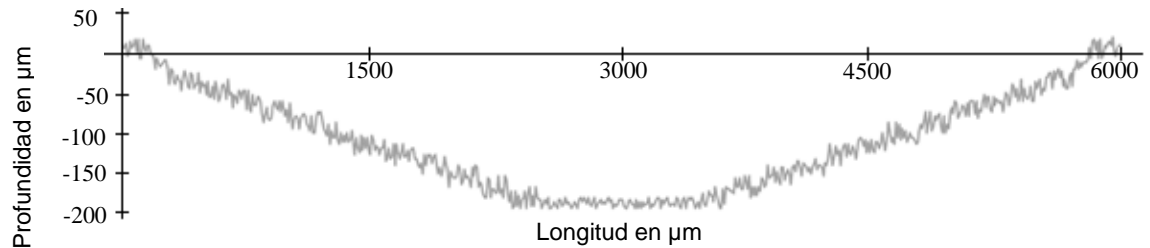


Figura 60. Perfilometría de la huella de desgaste con un ángulo de ataque de 90°.

La figura 61. Muestra la rugosidad del perfil a lo largo de la huella de desgaste cuando fue atacado a 10°, presentó un alargamiento del área de la huella con mayor profundidad del lado donde estuvo más cerca a la boquilla de blasteo.

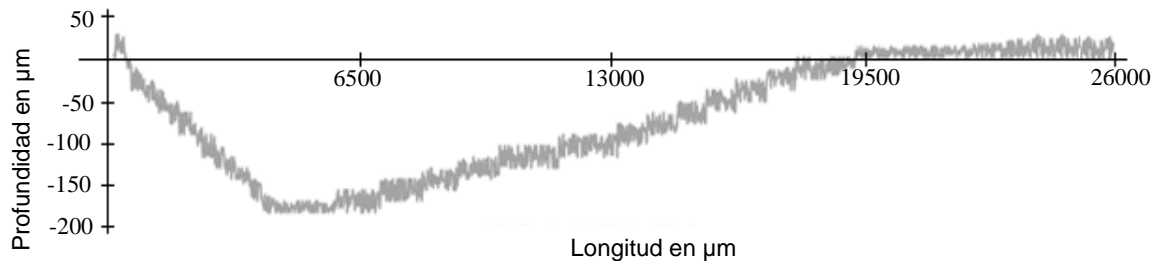


Fig. 61. Perfilometría de la huella de desgaste con un ángulo de ataque de 10°.

Discusión de resultados.

Las huellas de desgaste generadas con ceniza volcánica presentaron similitud con las que fueron formadas con arena sílica. Las vesículas de la ceniza volcánica generaron mayor daño durante el primer impacto y fueron fracturadas adhiriéndose electrostáticamente a la superficie formando una película delgada con partículas $\leq 20 \mu\text{m}$ que amortiguaron parcialmente los impactos posteriores. La película protectora delgada disminuyó su grosor en superficies colocadas en posición diferente a la horizontal, debido a que la gravedad hizo que fueran desprendidas las partículas con mayor facilidad no actuando como un escudo.

El flujo de blasteo con ceniza volcánica fue expulsado a través de la boquilla obedeciendo a un cono truncado de diámetro menor de 1mm, diámetro mayor 4.9090 mm, una altura de 10 mm, con una generatriz de 10.1970 mm y un volumen de 80.8809 mm³ en el sentido de flujo, donde las partículas fueron expandidas hasta impactar la superficie de ataque. Las partículas de diámetros $\leq 10 \mu\text{m}$ formaron una columna de ceniza alrededor del cono de expulsión.

Las partículas post impacto de ceniza volcánica no ocasionaron daño significativo por rebote, impacto o quemadura en la capa de *clear coat*. En la termografía fue reportado un promedio global de temperatura ha incrementado aproximadamente 4.3°C sobre las partículas post impacto provenientes de las cicatrices de desgaste hechas a 90° que fueron consideradas como las de mayor daño.

Las partículas de ceniza resultantes en la prueba fueron recolectadas por precipitación dentro de una cámara de blasteo durante los ensayos. Esta fue reciclada y utilizada en otra prueba piloto con un ángulo de ataque 90° determinando una reducción de los diámetros de la huella de desgaste de hasta 30%, debido a la mezcla con pintura automotriz y a que los bordes de las vesículas fueron fracturados convirtiendo en esféricas las partículas de ataque.

Las fotografías tomadas con una cámara de alta velocidad confirmaron que las partículas de ataque fueron proyectadas de la boquilla del blasteador a la superficie de ataque formando un flujo de expulsión de partículas con forma de cono truncado, y también fue observado que algunas partículas impactaron en sus trayectorias con otras formando estelas turbulentas que re direccionaron una mínima parte de la cantidad del flujo.

La huella de desgaste fue un círculo cuando el ataque fue perpendicular coincidiendo con la base de un cono truncado y formó una huella de desgaste elíptica cuando este fue intersecado por el plano de la superficie de ataque a diferentes ángulos.

La profundidad de la huella de desgaste fue inversamente proporcional a la distancia con la boquilla de blasteador, presentando mayor profundidad cuando fue atacado perpendicularmente cortando cada capa normal a la superficie y cuando el ángulo de ataque tiende a 180° , el desgaste fue escalonado y por delaminación de las capas.

La erosión por cavitación con partícula sólida con ceniza volcánica causó desgaste de los recubrimientos de pintura automotriz formando huellas que expusieron al metal a la lluvia ácida, salinidad del agua, químicos para limpieza de auto y medio ambiente húmedo generando corrosión general uniforme o ambiental y disolución anódica local o *pitting*.

Los inhibidores de corrosión fueron los recubrimientos de pintura automotriz que aislaron protegiendo el metal, pero cuando estos fueron delaminados con erosión por cavitación por partícula sólida el proceso de corrosión y los efectos destructivos fue iniciado, al cerrar y sellar la estructura cristalina con un aspecto de hoyos lisos que retardó su deterioro. La superficie oxidada dificultó que el sustrato continuara oxidándose hasta que fue llenada de corrosión o atacada por partícula sólida, delaminando y removiendo por *pitting* la capa de óxido que cubrió el sustrato en un fenómeno cíclico hasta la destrucción del sustrato.

Conclusiones.

- Debido a la morfología presentada por la ceniza volcánica se comporto en las pruebas tan abrasiva como la arena silica.
- Las partículas fueron impactadas en una superficie recubierta con pintura automotriz y se precipitaron aquellas $\geq 20 \mu\text{m}$, las restantes formaron una nube.
- La ceniza volcánica reciclada perdió hasta un 30% de su agresividad debido a que se fracturaron y arrancaron los bordes de sus vesículas convirtiéndolas en partículas semiesféricas.
- El diámetro y profundidad de las cicatrices de desgaste de erosión por cavitación con ceniza volcánica fueron dependientes de: velocidad, distancia, ángulo, presión, tasa de flujo abrasivo, dureza de los recubrimientos y la morfología de las partículas de ataque.
- La erosión y cavitación con partículas sólidas inició disminuyendo y eliminando las capas de recubrimiento, esto permitió infiltración de humedad medio ambiental en el sustrato provocando corrosión, oxidación, envejecimiento prematuro, delaminación y disminución de la estética.
- Las cicatrices de desgaste generadas con ceniza volcánica en ángulos que tienden a 180° con la superficie recubierta de pintura automotriz tuvieron un incremento 5 veces el diámetro grande y 1.32 veces el diámetro chico respecto a la huella de desgaste obtenida con ángulo de ataque normal a la superficie.
- las cicatrices generadas con ángulos de ataque de 90° se consideraron la unidad para referencia, así la huella generada con ángulos de ataque de 10° fue: *clear coat* 660%, *base coat* 296%, *primer* 209%, *antichip* 184%, *e coat* 175% y sustrato 120% respecto a las áreas promedio de desgaste obtenidas de las diferentes capas cuando fue generada la huella de manera perpendicular.
- La ceniza volcánica al mezclarse con agua cambia su alcalinidad y forma ácidos
- La ceniza volcánica sedimenta al deponerse y perder la humedad para formar capas de roca.

Referencias.

- [1] Carey S. N., Sigurdsson H. (1982). *Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth 87 7061–7072.
- [2] Hildreth W., Drake R. E. (1992). *Volcán Quizapu, Chilean Andes*, Bull Volcanol 54: 93–125.
- [3] Durant A. J., Rose W. I. (2009). *Sedimentological constraints on hydrometeor-enhanced particle deposition: 1992 Eruptions of Crater Peak, Alaska*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 186 40–59.
- [4] Rose W. I., Bluth G. J. S., Schneider D. J., Ernst G. G. J., Riley C. M., Henderson L. J., Mcgimsey R. G. (2001). *Observations of volcanic clouds in their first few days of atmospheric residence: The 1992 eruptions of Crater Peak, Mount Spurr Volcano, Alaska*, Journal Geology. 109 (6) 677–694.
- [5] Gilbert J. S., Lane S. J. (1994). *The origin of accretionary lapilli*, Bull Volcanol 56: 398–411.
- [6] Schumacher R., Schmincke H. U. (1991). *Internal structure and occurrence of accretionary lapilli – a case study at Laacher See Volcano*, Bull Volcanol 53: 612–634.
- [7] Schumacher R., Schmincke H.-U. (1995). *Models for the origin of accretionary lapilli*, Bull Volcanol 56: 626–639.
- [8] Veitch G.W., Woods A.W.; (2001). *Particle aggregation in volcanic eruption columns*, Journal Geophysical Research 106, 26425–26441.
- [9] Costa A., Folch A., Macedonio G. *A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 1. Theoretical formulation*, Journal of Geophysical Research 115, B09201. doi: 10.1029/2009JB007175.
- [10] Folch A., Costa A., Macedonio G. (2010). *A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 2. Model application*, Journal of Geophysical Research 115, B9. doi: 10.1029/2009JB007176.
- [11] Textor C., Graf H. F., Herzog M., Oberhuber J. M., Rose W. I., Ernst G.G.J. (2006). *Volcanic particle aggregation in explosive eruption columns. Part I: parameterization of the microphysics of hydrometeors and ash*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 150 359–377.
- [12] Brown R.J., Bonadonna C., Durant A.J. (2012). *A review of volcanic ash aggregation, Physics and Chemistry of the Earth*. 45–46 65–78.
- [13] Sorem R. K.; (1982). *Volcanic ash clusters: Tephra rafts and scavengers*, Journal of Volcanology Geothermal Research 13 63–71.
- [14] Lane S. J., Gilbert J. S., Hilton M. (1993). *The aerodynamic behaviour of volcanic aggregates*, Bull Volcanol 55: 481–488.
- [15] Barsotti S., Neri A. *The VOL-CALPUFF Model for Atmospheric Ash Dispersal: I. Approach and Physical Formulation*, Journal of Geophysical Research, doi: 10.1029.
- [16] Barsotti S., Neri A., and Scire J. S. *The VOL-CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 1. Approach and physical formulation*, Journal of Geophysical Research, vol. 113, B03208, doi: 10.1029/2006JB004623, 2008.
- [17] Costa A., Macedonio G., Folch A. (2006) *A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes*, Earth and Planetary Science Letters 241 634–647.
- [18] Searcy C., Dean K., Stringer W. PUFF: (1998) *A high-resolution volcanic ash tracking model*, Journal of Volcanology and Geothermal Research. 80, 1–16.
- [19] Rosenbaum J.G., Waitt R. B. (1980). *Summary of eyewitness accounts of the May 18 eruption in Lipman, W.P., Mullineaux, D.R., (Eds.), Eruptions of Mount St. Helens, Washington. US Geological Survey Professional Paper Washington, DC, 601–616.*
- [20] Hobbs P. V., Lyons J.H., Locatelli J.D., Biswas K.R., Radke L.F., Weiss R.R., Rangno A.L. (1981). *Radar detection of cloud-seeding effects*. Science 213, 1250–1252.
- [21] Bonadonna C., Phillips J. C.; *Sedimentation from strong volcanic plumes*, Journal of Geophysical Research, vol. 108, no. b7, 2340, doi: 10.1029/2002jb002034, 2003.

- [22] Moore J. G., Peck D. L. (1962). *Accretionary Lapilli in Volcanic Rocks of the Western Continental United States*. The Journal of Geology 70, 182–194.
- [23] Fisher R.V., Schmincke H.-U. *Pyroclastic Rocks*, Springer-Verlag, 472.
- [24] Reimer T.O. *Accretionary lapilli in volcanic ash falls: physical factors governing their formation in Peryt, T.M.* (Ed.), Coated Grains. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 56–68.
- [25] Scolamacchia T., Macías J. L., Sheridan M. F., Hughes S. R. (2005). *Morphology of ash aggregates from wet pyroclastic surges of the 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico*, Bull Volcanol 68: 171–200.
- [26] Lindqvist H., Nousiainen T., Zubko E., Muñoz O. (2011). *Optical modeling of vesicular volcanic ash particles*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 112 1871–1880.
- [27] Riley C. M., Rose W. I., Bluth G. S. *Quantitative shape measurements of distal volcanic ash*, Journal of Geophysical Research. 2003. doi: 10.1029/2001JB000818.
- [28] V. Lorenz. (1974). *Studies of the surtsey tephra deposits*. Surtsey Research Progress Report 7, 72–79.
- [29] Rosi M.; *A model for the formation of vesiculated tuff by the coalescence of accretionary lapilli*, Bull Volcanol 54, 429–434.
- [30] James M.R., Gilbert J.S., Lane S.J.; *Experimental investigation of volcanic particle aggregation in the absence of a liquid phase*, Journal of Geophysical research, Vol. 107, No. b9, 2191, doi: 10.1029/2001JB000950, 2002.
- [31] Thordarson T. (2004) *Accretionary-lapilli-bearing pyroclastic rocks at ODP Leg, 192 Site, 1184: a record of subaerial phreatomagmatic eruptions on the Ontong Java Plateau.*, Origin and Evolution of the Ontong Java Plateau. Geol. Soc. London. Spec. Pub. 229, 275–306.
- [32] Brown R. J., Branney M. J., Maher C., Dávila-Harris P.; *Origin of accretionary lapilli within ground-hugging density currents: evidence from pyroclastic couplets on Tenerife*. Bull. Geological Society of America 122, 305–320.
- [33] Hayakawa Y. (1990). *Mode of eruption and deposition of the Hachinohe phreatoplinian ash from the Towada Volcano Japan*, Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University 25 167–182.
- [34] Sisson T.W. (1995). *Blast ash fall deposit of May 18, 1980. at Mount St. Helens, Washington*, Journal of Volcanology and Geothermal Research Volume 66, Issues 1-4, July, 203–216.
- [35] Watanabe K., Ono K., Sakaguchi K., Takada A., Hoshizumi H. (1999). *Co-pyroclastic density current ash-fall deposits of the 1991 eruptions of Fugen-dake, Unzen Volcano, Japan*, Journal of Volcanology Geothermal Research 89 95–112.
- [36] Trusdell F. A., Moore R. B., Sako M, White R. A., Koyanagi S. K, Chong R., Camacho J. T. (2005). *The 2003 eruption of Anatahan volcano, Commonwealth of the Northern Mariana Islands: chronology, volcanology, and deformation*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 146 184–207.
- [37] Schumann U., Weinzierl B., Reitebuch O., Schlager H., Minikin A., Forster C., ... K. Sturm. (2011). *Airborne observations of the eyjafjallajökull volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010*, Atmos. Chem. Phys. 11, 2245-2279.
- [38] Ruggieri F., Saavedra J., Fernandez-Turiel J. L., Gimeno D., Garcia-Valles M. (2010). *Environmental geochemistry of ancient volcanic ashes*, Journal of Hazardous Materials 183 353–365.
- [39] Siddique R. (2012). *Properties of concrete made with volcanic ash*, Resources, Conservation and Recycling. 66, 40–44.
- [40] Delmelle P, Lambert M, Dufrière Y, Gerin P, Óskarsson N. (2007). *Gas/aerosol-ash interaction in volcanic plumes: New insights from surface analyses of fine ash particles*, Earth and Planetary Science Letters 259 159–170.
- [41] Lettino A, Caggiano R, Fiore S, Macchiato M, Sabia S, Trippetta S. (2012). *Eyjafjallajökull volcanic ash in southern Italy*, Atmospheric Environment 48, 97–103.
- [42] Khandaker Hossain M. A. (2005). *Chloride induced corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based blended concrete*, Cement & Concrete Composites. 27, 381–390.
- [43] Siddique R. (2011). *Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar*, Resources, Conservation and Recycling. 56, 66–70.

- [44] Heiken G., Wohletz K. (1985). *Volcanic ash*, University of California Press, Berkeley, California. 245
- [45] Muñoz O., Volten H., Hovenier J.W., Veihelmann B., Vander Zande W. J., Waters L. B. F. M., Rose W. I. *Scattering matrices of volcanic ash particles of Mount St. Helens, Redoubt, and Mount Spurr Volcanoes*, Journal of Geophysical Research Vol, 109, D16201, doi: 10.1029/2004 JD 004684, 2004.
- [46] Vite J. , Vite M., Castillo M., Laguna-Camacho J. R., Soto J., Susarrey O. (2010). *Erosive wear on ceramic materials obtained from solid residuals and volcanic ashes*, Tribology International 43, 1943–1950.
- [47] Rutherford K. L., Trezona R. I., Ramamurthy A. C., Hutchings I. M. (1997). *The abrasive and erosive wear of polymeric paint films*, Wear 203-204, 325–334.
- [48] Lonyuk M., Bosma M., Riemslog A. C., Zuidema J., Bakker A., Janssen M. (2007). *Stone-impact damage of automotive coatings: A laboratory single-impact tester*, Progress in Organic Coatings 58, 241–247.
- [49] Noui-Mehidi M. N., Graham L. J. W., Wu J., Nguyen B. V., Smith S. (2008). *Study of erosion behaviour of paint layers for multilayer paint technique applications in slurry erosion*, Wear 264,737–743.
- [50] Ramamurthy A. C., Buresh G. A., Nagy M., Howell M. (1999). *Novel instrumentation for evaluating stone impact wear of automotive paint systems*, Wear 225–229, 936–948.
- [51] Potter T.A., Jacobs P.B., Engbert T., Bock M. (1998). *Scratching of automotive OEM Clearcoats - Method and media effects*, Paper 980975, SAE International, Detroit, MI.
- [52] Jacobs P.B., Engbert T. (1999). *Studies on scratch and Mar resistance of polyurethane coatings*, Paper 960913, SAE International, Detroit, MI, 1996.948 A.C. Ramamurthy et al. Wear 225–229, 936–948.
- [53] Ramamurthy A.C., Buresh G., Jones A., S. Shah, Szczepanaik E., Edge D., Freese J.W., Linberg P. (1998) *Durability of painted automotive exteriors subject to high-pressure water jets: simulation of touch free car wash environments*, Paper 980974, SAE International, Detroit, MI.
- [54] Ramamurthy A. C., Lorenzen W. I., Bless S. J. (1994). *Stone impact damage to automotive paint finishes: An introduction to impact physics and impact induced corrosion*, Progress in Organic Coatings 25, 43-71.
- [55] Zehnder A. T., Ramamurthy A. C., Bless S. J., Brar N. S. (1993). *Stone impact damage to automotive paint finishes: measurement of temperature rise due to impact*, International Journal of Impact Engineering. 13, 133-143.
- [56] Ramamurthy A. C., Isbell W. M., Venditto V. A., Jennings T. (1993). *Stone impact damage to automotive paint finishes: A precision instrumented impact device for laboratory simulations*, Paper 93231, SAE International, Dearborn, MI.
- [57] Ramamurthy A. C., Ahmed T., Favro L. D., Thomas R. L., Hohnke D. K., Cooper R. P. (1993). *Stone impact damage to automotive paint finishes: post-impact damage analysis*, Paper 930051, SAE International, Detroit, MI.
- [58] Ramamurthy A. C., Lorenzen W. I., Uriquidi-Macdonald M. (1993). *Stone impact damage to automotive paint finishes—A statistical and neural net analysis of electrochemical impedance data*, Electrochemical Acta 38 2083.
- [59] Ramamurthy A. C., Sporrang M., Strom M., Strom G.; (1993). *Stone impact damage to automotive paint finishes: Impact induced corrosion in painted pre-coated sheet steels*, Paper 932332, SAE International, Dearborn, MI,
- [60] Ryntz R. A., Ramamurthy A. C., Holubka J. W. (1995). *Stone impact damage to painted plastic substrates*, Journal of Coatings Technology 67, 23.
- [61] Ramamurthy A.C., Charest J.A., Lilly M.D., Mihora D.J., Freese J.W. (1997). *Friction induced paint damage, a novel method for objective assessment of painted engineering plastics*, Wear 203, 350.
- [62] Mihora D.J., Ramamurthy A.C. *Friction induced paint damage: preliminary numerical analysis of stresses within painted automotive plastics induced by large curvature counter faces*, Wear 203.1997.362.
- [63] Ryntz R. A., Ramamurthy A. C., Mihora D. J. (1995). *Thermal and impact induced stress failures in painted TPO: The role of surface morphology, (thermoplastic olefins)*. Journal of Coatings Technology 67, 35.
- [64] Rutherford K. L., Trezona R. I., Ramamurthy A. C., Hutchings I. M. (1997). *The abrasive and erosive wear of polymeric paint films*, Wear 203, 325-334.

- [65] Ramamurthy A.C., Szczeplaniak E., Mihora D.J. (1998). *Friction induced paint damage: An objective assessment of three coating systems*, Paper 980711, SAE International, Detroit, MI.
- [66] Mihora D.J., Ramamurthy A.C., Venditto V.A. (1998). *2D/3D TPO fascia testing to mimic real world friction induced damage by cohesive and delamination failures*, Paper 980712, SAE International, Detroit, MI.
- [67] Ottviani R.A., Iyeangar V., G.D. Cheever. (1997). *Use of the goniophotometer for scratch and MAR testing of automotive topcoats*, Paper 970988, SAE International, Detroit, MI.
- [68] Shipway P.H., Bromley J.P.D., Weston D.P. (2007). *Removal of coatings from polymer substrates by solid particle blasting to enhance reuse or recycling*. *Wear* 263, 309–317.
- [69] Pickles M.J., Trezona R.I., Hutchings I.M., Ramamurthy A.C., Freese J.W.; (1988). *Novel methods for characterizing the mechanical durability of automobile paint systems*, Paper 980977, SAE International, Detroit, MI.
- [70] Adamsons K. (2000). *Chemical surface characterization and depth profiling of automotive coating systems*, *Prog. Polym. Sci.* 25, 1363–1409.
- [71] Adamsons K. (2002). *Chemical depth profiling of multi-layer automotive coating systems*, *Progress in organic coatings* 45, 69–81.
- [72] Papini M., Spelt J. K. (1997). *Organic coating removal by particle impact*, *Wear* 213, 185-199.
- [73] Laguna J.R., Cruz- L.A., Anzelmetti J.C., Marquina A., Vite M., Martínez J. (2012). *Solid particle erosion on coatings employed to protect die casting molds*, *Progress in Organic Coatings* 74, 750– 757.
- [74] R.I. Trezona, I.M. Hutchings; *Resistance of paint coatings to multiple solid particle impact: effect of coating thickness and substrate material*, *Progress in Organic Coatings* 41 (2001) 85–92.
- [75] Trezona R.I., Pickles M.J., Hutchings I.M. (2000). *A full factorial investigation of the erosion durability of automotive clearcoats*, *Tribology International* 33, 559–571.
- [76] Gonzalez G., Valdez C., Arciniega A. (1995). *Global Volcanism Network Bulletin* v. 20, no. 4, April, Smithsonian Institution.
- [77] Rivera J. *La actividad volcánica y su relación con el medio ambiente y salud*. ICBUAP. Recuperado de www.ejournal.unam.mx/rfm/no47-5/RFM47505.pdf.
- [78] Robles S. (2013). *Analizan académicos del tecnológico de monterrey afectaciones de la actividad del popocatepetl*. Puebla noticias. Recuperado de <http://pueblanoticias.com.mx/noticia/analizan-academicos-del-tecnologico-de-monterrey-afectaciones-de-la-actividad-del-popocatepetl-36138/>.
- [79] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Estados, Elevaciones principales Puebla*, 2012.
- [80] UNAM. *Volcanes activos de México*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2014, de Instituto de Geofísica, UNAM: <http://www.volcanpedia.com/tipos-de-erupciones-volcanicas>.
- [81] Hernandez D. (Revista Julio Agosto 1998). *El volcán Popocatepetl.*, Difusión Cultural Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado de www.uam.mx/difusion/revista/julio-agosto98/volcan.html
- [82] Shipley S. y Sarna-Wojcicki A. M. (1982). *Distribution, Thicknes and mass of late pleistocene and holocene tephra from major volcanoes in the northwestern united states : A preliminary assesment of hazards from volcanic eject a to nuclear reactors in the pacific northwest*, 3-4.
- [83] Robles S. (2013). *Ceniza volcánica es patentada para su uso en la industria textil*. Excelsior, Recuperado de <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/08/05/912212>.
- [84] Shaffer S. (2013). *Introduction to the Basics of Tribology*. Bruker, Recuperado de http://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Tribology_101_Webinar-1_Intro_and_Basics_29-Jan-2013.pdf.
- [85] Gallardo, E.A. (2002). *Desarrollo de un prototipo tribológico funcional de configuración pernos sobre disco para medir el desgaste por deslizamiento en condiciones secas y lubricadas*. Mexico: SEPI-ESIME-UZ, IPN.
- [86] Martínez F. (2002). *La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento*. Limusa edit. México, 9-25.
- [87] Hutchings I. M. (2003). *Tribology: Friction and wear of Engineering Materials*. UK: University of Cambridge.

- [88] Engineers edge L.L.C. *Applications of solid lubrication*. (2000) Recuperado de <http://www.engineersedge.com/lubrication/.htm>.
- [89] Bosman R. and Schipper D.J. *Microscopic mild wear in the boundary lubrication regime*. Laboratory for surface technology and tribology, Netherlands.
- [90] Budney R. Good. *Lubrication practices can reduce gearbox failures*. RBB Engineering, Santa Barbara. Recuperado de <http://www.navindpower.com/issues/NAW1309>
- [91] Dobrovolski V., K. Zablonki, A. Radchik, L. Erlij,. (1976). *Elementos de máquinas*. Moscú Pag. 54.
- [92] Rabinowicz E. (1995). *Friction and wear of materials*. New York, John Wiley and Sons.
- [93] Bowden T. (1950). *Friction and lubrication of solids*, Oxford: Clarendon Press.
- [94] Zum Gahr K.-H. (1987). *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, Amsterdam, 560 S.
- [95] Burriel M. F; Arribas J. S; Lucena F; Hernández J. (2007). *Química analítica cualitativa*. Edit. Paraninfo. 2012. 175.
- [96] Gurrappa I, Binder L, (2008). *Electrodeposition of nanostructured coatings and their characterization, a review*. Sci. Technol. Adv. Mater. 9, 1-11.
- [97] Tanaka Y, Dekker M, *Epoxy Resins Chemistry and technology*, Chapter 2: Synthesis and characterization of epoxides, 1998 pp 54-63.
- [98] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España. (2010) *Ficha internacional de seguridad química del uretano*. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0314.pdf>
- [99] Hepburn, C. (1992). *Polyurethane elastomers recherches sur les ethers cyaniques et leurs derives*. Elsevier 241.
- [100] Wanqiu Z, Dayong S, En-Hou Hana, Wei Kea. (2008). *Structure and formation mechanism of phosphate conversion coating on die-cast AZ91D magnesium alloy*. 50, 329-337.
- [101] Mitsuba systems (2008). *Powdergun, The cathophoretic phosphated treatment*. Recuperado de http://www.powdergun.com/PDFs_cat/Sieving%20Systems.pdf. India. 400 053.
- [102] Lou H.H. y Huang Y. (2006). *Electroplating Encyclopedia of Chemical Processing*, New York, NY, 1-10.
- [103] Salvo S.A. A. (2007). *Proceso de Fosfatizado*. Recuperado de <http://pmsalvo.com/fosfatizado.html> SALVO S.A.A. Provincia de Córdoba, República Argentina, 2014.
- [104] Columbec del Ecuador S.A. (2005). *Plantas de ensablado y fabricación automotriz*. Recuperado de http://www.columbec.com/images/proyectos_esp/proyec_cabinas_auto.jpg.
- [105] Audi Standort Aurangabad Indien Produktion *Surface coating at Audi*. (2011) Audi TV. Recuperado de Video. <http://www.youtube.com/watch?v=-zZSwhBNYQ>. Germany.
- [106] Ghini A, Di Genaro G. (2009) *458 paint área Ferrari SPA. Official Ferrari Magazine*. Italia. Recuperado de http://www.youtube.com/watch?v=1wWVx_J94ks.
- [107] Vickerman E, (2005) *Surfaces analysis: The principal techniques*, Wiley, 22.
- [108] Schmalz G. (1929). *Ueber glatte und ebenheit als pshickalisches und pshiologhishes problem*, zeitschrift des vereines deustcher ingenieure, 1461-1467.
- [109] Thomas T.R., (1999). Rosén B.-G., Amini N., *Fractal characterization of the anisotropy of rough surfaces*, Wear 232, 41-50.
- [110] Bhushan B. (2002). *Introduction to tribology*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [111] Von Ardenne, Manfred. *Das elektronen rastermikroskop theoretische grundlagen*. *Zeitschrift für Physik* 109, 553-572.

- [112] Palko E. (1993). *Thermography instruments for predictive maintenance*, Plant engineering, 64-68.
- [113] Incropera F, DeWitt D, (1985) *Introduction to heat transfer* (New York: John Wiley & Sons) 508-510, 524.
- [114]. Lennox P. (1996), Infrared keeps all systems go, Maintenance technology. 55-57146 Issue 9, p200. Recuperado de <http://connection.ebscohost.com/tag/AGEMA%2BInfrared%2BSystems%2BAB>.
- [115] Vincent R. K, (1997). *Fundamentals of geological and environmental remote sensing*. Prentice Hall, New Jersey. 366.
- [116] Gilman J. (2009). *Hardness, bearings and the rockwells. Advanced materials and processes*. 167 10, 29-31.
- [117] Berkovich E.S., (1950). Three faceted diamond pyramid for studying microhardness by indentation, *Zavodskaya Laboratoria*, 13, 345-347.
- [118] Khrushchov M.M. & Berkovich E.S., (1951). *Methods of determining the hardness of very hard materials: The hardness of diamond*, *Industrial diamond review*, 11, 42-49.
- [119] Oliver W., Pharr M. (2004). *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology*, *J. Mater. Res.* 19 3.
- [120] Fuentes P., Murillo J., (2002). *Geometria analítica*, La elipse. México. 22.
- [121] Beyer, W. H. (1987). *CRC Standard Mathematical Tables*. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 129-130 and 133.

Anexos.

Tabla 4. La actividad volcánica del Popocatépetl.

AÑO	ACTIVIDAD DEL VOLCAN POPOCATEPETL A LO LARGO DE LA HISTORIA
23000 a.c	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo.
14000 a.c	Gran erupción pliniana produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México.
1539-1549	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez
1919-1927	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubo algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre.
1994-1997	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Se forma un domo de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personas perecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida en mayo de 1996.
2000	Erupciones del 18 y 19 de diciembre, aunque con una relativa baja explosividad, pero de duración larga, lanzaron grandes cantidades de fragmentos incandescentes en los flancos del volcán, en tres diferentes episodios. El 24 de diciembre se dio otra erupción, lanzando fragmentos incandescentes a distancias de 2.5 km del volcán y produciendo una columna de ceniza de aproximadamente unos 5 km sobre el cráter.
2002-2007	La actividad del volcán fue normal. Con esporádicas exhalaciones que incluyen vapor de agua, gas y ceniza en algunas ocasiones en pequeña cantidad.
2009-2010	La actividad del volcán fue normal. Con esporádicas exhalaciones que incluyen vapor de agua, gas y ceniza en algunas ocasiones en pequeña cantidad.
2011	El cuatro de Junio entraría en una fase eruptiva de baja densidad, misma que no tuvo mayores afectaciones a la población. Durante esta fase, las fumarolas alcanzaron un kilometro de altura.
2012	Los días 17 y 18 de junio el volcán registró varios eventos explosivos de mayor magnitud, registrando Fumarolas que alcanzaron los 4 km sobre el nivel del cráter y expulsiones de roca incandescente que alcanzaron las faldas en el lado Sur-Oeste del coloso. La alerta se mantuvo en Amarillo Fase 2. Esta actividad, propició a varias lluvias de ceniza en la Ciudad de Puebla.
2013	El volcán entró en actividad el 7 de julio del año 2013, lanzando ceniza claramente visible en poblaciones cercanas, la ceniza también alcanzó la Ciudad de México, expulsando flujos piroclásticos e incandescencia. El semáforo volcánico se sitúa en amarillo fase 3.

Considerando la posibilidad de un evento mayor del Popocatépetl, los efectos más serios de una erupción están marcados en el Mapa de Peligros Volcánicos del Popocatépetl, que ha sido publicado por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Y estos se limitarían a la cercanía del volcán, con radios de 20 a 30 km. Un evento de esta naturaleza será previsto por los sistemas de detección y monitoreo del volcán con anticipación [79].

Se muestra un mapa proporcionado por el CENAPRED de las zonas afectadas y su grado de riesgo por actividad volcánica

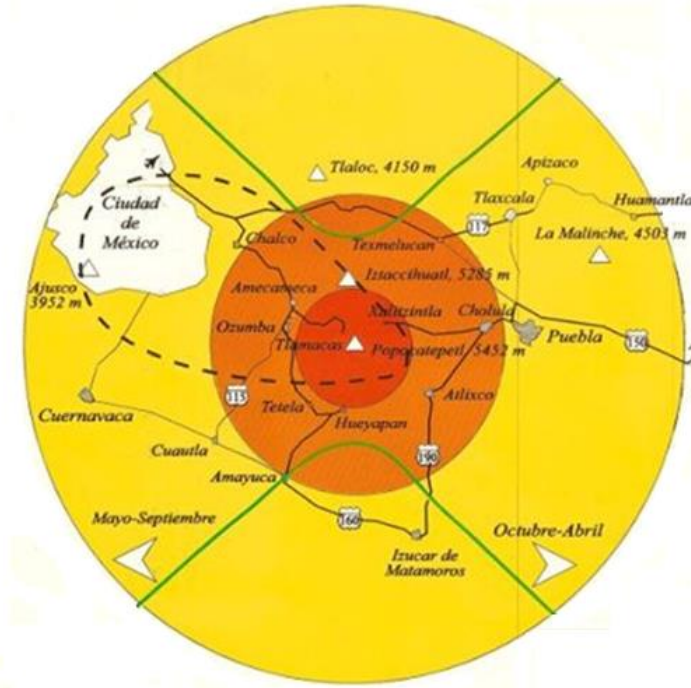


Figura 62. Mapa de zonas de afectación por evento mayor del volcán Popocatépetl.

Volcanes activos en el mundo

Europa y el Océano Atlántico: Stromboli (Islas eólicas, Italia), Etna (Sicilia, Italia), El Hierro (Islas Canarias, España).

Islandia: Zona de fractura de Tjörnes (Al norte de Islandia), Kverkfjöll (Islandia oriental), Katla (Sur de Islandia), Askja (Central Iceland), Bárdarbunga (Iceland), Grímsvötn (Iceland), Hekla (Iceland), Torfajökull (Iceland).

África y Océano Índico: Ol Doinyo Lengai (Tanzania), Erta Ale (Ethiopia), Barren Island (Océano Índico), Nyiragongo (DRCongo), Oído (Australia, el Océano Índico meridional), Nyamuragira (DRCongo), Campo volcánico Tahalra (Argelia).

Indonesia: Sinabung(Sumatra, Indonesia), Dukono (Halmahera, Indonesia), Ibu (Halmahera, Indonesia), Lokon-Empung (North Sulawesi, Indonesia), Gamalama(Halmahera, Indonesia), Sangeang Api(Indonesia), Semeru (East Java, Indonesia), Batu Tara (Islas de la sonda, Indonesia).

Islas Aleutianas, Alaska y América del Norte: Pavlov (Península de Alaska, Estados Unidos).

América Central y Caribe: Colima (Occidente de México), Santa María / Santiaguito(Guatemala),Fuego (Guatemala), Volcán Popocatépetl (Central Mexico), San Miguel (El Salvador), San Cristóbal (Nicaragua), Rincón de la Vieja (Costa Rica), Poas (Costa Rica), Irazu (Costa Rica), Soufriere Hills (Montserrat, West Indies (UK), Pacaya (Guatemala), Telica (Nicaragua), Cerro Negro (Nicaragua) Momotombo (Nicaragua), Masaya (Nicaragua), Concepción (Nicaragua), Turrialba (Costa Rica).

América del sur: Ubinas (Perú), Tungurahua (Ecuador), Reventador (Ecuador), Copahue, (Chile y Argentina), Sangay (Ecuador), Sacabaya (El norte de Chile, Bolivia y Argentina, América del sur).

Otras regiones: Erebus (La Antártida), Zavodovski (South Sandwich Islands (UK), Siple (Marie Byrd Land, Western Antarctica).

Océano Pacífico: Kilauea (Hawai), Bagana (Bougainville Island, Papua New Guinea), Karkar (Al noreste de Nueva Guinea, Papua Nueva Guinea), Manam (Papua Nueva Guinea), Yasur (Tanna Island, Vanuatu), Ambrym(Vanuatu), Tinakula (Santa Cruz Islands, Solomon Islands).

Anillo de fuego (Islas Kuriles a Filipinas): Shiveluch(Kamchatka), Kizimen (Kamchatka), Karymsky(Kamchatka), Grozny (Iturup Island, Kuril Islands), Sakurajima (Kyushu, Japón), Suwanose-jima (Islas Ryukyu, Japan), Nishino-shima (Volcano Islands, Japan).

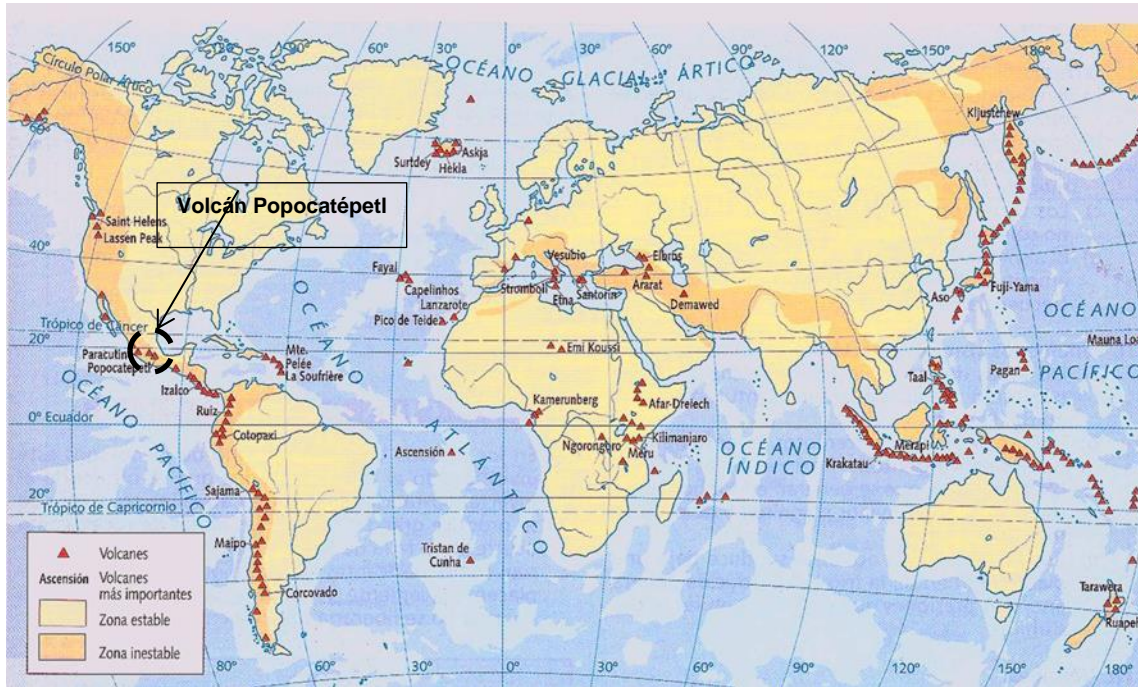


Figura 63. Mapamundi mostrando los volcanes activos del planeta.