



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Área Académica de Ciencias de la Tierra y  
Materiales

*“Formulación de adhesivos cerámicos  
utilizando rocas piroclásticas con adición de  
microesferas aluminosilicatadas como  
alternativa tecnológica”*

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**Doctor en Ciencias de los Materiales**

Presenta

**Ester Marcela Magos Cortes**

Director de tesis

**Dr. Kinardo Flores Castro**



Laboratorio de Geoquímica

Pachuca, Hidalgo 2016



ICBI-D/169/2016

**M. en A. Julio César Leines Medécigo**  
 Director de Administración Escolar  
 PRESENTE

Por este conducto le comunico que el jurado asignado a la pasante, del Doctorado en Ciencias de los Materiales, **C. Ester Marcela Magos Cortes**, con número de cuenta 127284, quien presenta el trabajo de tesis titulado **"Formulación de adhesivos cerámicos utilizando rocas piroclásticas con adición de microsferas aluminosilicatadas como alternativa tecnológica"**, después de revisar el trabajo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión del mismo una vez realizadas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado.

- PRESIDENTE: Dr. Juan Hernández Ávila
- SECRETARIO: Dr. Marius Ramírez Cardona
- VOCAL: Dr. Kinardo Flores Castro
- SUPLENTE: Dr. Edgar Cardoso Legorreta

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, 1 de enero del 2016.

  
 Dr. Orlando Ávila Pozos  
 Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx



[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

## DEDICATORIA

*Con todo mi amor y cariño a mi hija Alourde Leyla Valentín, tu afecto y cariño son mi motivación más grande, por ser mi propósito de superación día a día, a tu corta edad me has enseñado sabias lecciones mi pequeña. Llenas de ilusión mi vida entera hija ¡te amo!.*

*A mi compañero de vida Dieuwins Valentín corrimos juntos esta carrera amor, ¡¡por fin lo logramos a la par!!, gracias por brindarme consejo y apoyo cuando más tenía dudas, gracias por creer en mí. por ser parte importante y especial en mi vida, ocupas un lugar muy especial en mi corazón ¡¡te súper amo carí!!.*

*También dedico este trabajo a mi mamá Margarita Cortes, por estar presente en todos momentos buenos y malos que nos traza la vida, por su constante apoyo y consejos que me han servido en el trascurso de toda*

la vida, eres una mujer que admiro mamá, gracias por sacarnos adelante ¡este logro también es tuyo!. Sin dejar de mencionar también a mi amado padre **Rodolfo Magos**, quien hizo de mí una persona seria, responsable y trabajadora desde muy joven, seguramente está viendo este gran logro desde el cielo, con respeto y admiración a ti papá.

A mis hermanos **Daniela**, **Rodolfo Magos** y **Edgar Cortes** por su cariño y por estar presentes en cada momento importante, gracias por las desveladas que en su compañía siempre fueron divertidas.

A **Olí Cortes** quien siempre ha estado para apoyarme incondicionalmente, depositando su entera confianza en mí sin dudar ni un solo momento de mis capacidades, gracias por ser un ejemplo de mujer te quiero mucho **Olita**.

*A todos ustedes los amo con toda mi alma.*

Marce.

## AGRADECIMIENTOS

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo financiero para la realización de mis estudios de Doctorado.*

*A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, (UAEH) mi alma mater, agradezco sus conocimientos impartidos desde mi formación media superior hasta ahora a través del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACCyM). Por darme la impunidad de esta aventura que fue el Doctorado.*

**Dr. Kinardo Flores Castro**

*Director de mi tesis, infinitas gracias, por su apoyo brindado en la realización de este proyecto, por su tiempo, consejos, dedicación y esfuerzo para que esto se lograra con éxito. Por esa calidez humana que tiene y el entusiasmo que trasmite para seguir adelante. Gracias por confiar en mí y compartir sus conocimientos. Gracias por brindarme su sincera amistad. Ha sido un privilegio trabajar con usted.*

*Al Maestro Amando Padilla e Iván Panamá  
De la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad  
Azcapotzalco (UAM), cuya colaboración ha  
enriquecido este trabajo, Gracias al magnífico  
equipo profesional por su mente prodigiosa, su buen  
criterio, y su buena disponibilidad a colaborar en  
esta investigación.*

*Dr. Màrius Ramírez Cardona, Juan Hernández  
Avila, y Edgar Cardoso Legorreta*

*Por ayudarme en la interpretación de resultados, y  
sus oportunas observaciones, por su estímulo  
contante dentro y fuera de las aulas en mi  
formación profesional.*

*Agradezco a mis profesores, por ser el pilar de mi  
formación profesional, a mis compañeros que  
contribuyeron de alguna manera e hicieron que mi  
formación profesional fuera fructífera y agradable.  
Gracias a las personas que de alguna manera u otra  
han sido claves en mi vida profesional.*

*Gracias de todo corazón*

## **RESUMEN.**

Este trabajo presenta el desarrollo de cuatro nuevos adhesivos cerámicos de bajo peso específico elaborados a base de materiales residuales de origen geológico, a los que se les adicionó microesferas de aluminosilicato, un aditivo y un flurificante con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas de fluidez y adhesivas. Este desarrollo tecnológico consistió primeramente en la caracterización de los materiales residuales, conjuntamente con cuatro adhesivos cerámicos comerciales con los que fueron comparados. La caracterización involucró el comportamiento en estado fresco y sólido tomando como base la Norma NOM C420. La fluidez de los materiales comerciales varía desde 33% al 83% y los desarrollados en esta investigación van desde 75% hasta 150%. Por otro lado, la resistencia a la compresión de los adhesivos comerciales está por debajo de 100 kg/cm<sup>2</sup>, con excepción de uno que presentó una resistencia del orden de 194 kg/cm<sup>2</sup>. Los adhesivos desarrollados en este trabajo mostraron una resistencia a la compresión de 199.0 y hasta 272.7 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de fraguado. Finalmente, la determinación del peso volumétrico de los nuevos adhesivos fue del orden de 1,700 kg/m<sup>3</sup> y los resultados obtenidos de estas nuevas formulaciones permiten inferir que son económicas, ecológicas, sustentables y que podrán ser empleadas industrialmente.

## **ABSTRACT.**

This paper presents the development of four new lightweight ceramic adhesives prepared from waste materials of geological origin, which were added aluminosilicate microspheres and an additive in order to improve their mechanical properties and adhesive flow. This technological development consisted primarily in the characterization of the waste materials, together with four commercial ceramic adhesives, with which they were compared. The characterizing involved the behavior in fresh and solid state based on NOM C420. The fluidity of commercial materials varies from 33% to 83% and developed in this research range from 75% to 150%. Moreover, the compressive strength of commercial adhesives is below  $100 \text{ kg/cm}^2$ , but one that showed a resistance of about  $194 \text{ kg/cm}^2$ . The adhesives developed in this study showed a compressive strength of 199.0 and up to  $272.7 \text{ kg/cm}^2$  at 28 days of curing. Finally, the determination of the volume and weight of the new adhesive was around  $1,700 \text{ kg/m}^3$  and the results of these new formulations allow inferring that are economic, ecological, sustainable and can be used industrially.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE.....	III
LISTADO DE FIGURAS.....	VI
LISTADO DE TABLAS.....	VIII
LISTADO DE GRÁFICAS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	11
<b>Capítulo 1 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Cemento.....	14
1.2 Descripción de los componentes.....	15
1.3 Tipos de cemento.....	17
1.3.1.- Cementos blancos.....	17
1.3.2.- Cementos de mezclas.....	18
1.3.3.- Cemento puzolánico.....	18
1.3.4.- Cemento siderúrgico.....	19
1.3.5.- Cemento de fraguado rápido.....	19
1.3.6.- Cemento aluminoso.....	19
1.4 El cemento Portland.....	20
1.4.1.- Fabricación del cemento Portland.....	20
1.4.2.- Reacciones de formación del <i>clinker</i> .....	22
1.4.2.1 <i>Función del yeso</i> .....	23
1.4.2.2 <i>Módulos</i> .....	23
1.5 Reacción de las partículas de cemento con el agua.....	26
1.6 Almacenamiento.....	27
1.7 Impacto ambiental de la industria del cemento.....	27
1.7.1.- Impactos ambientales potenciales.....	27
1.7.2.- Emisiones de partículas a la atmósfera.....	28
1.8 Normativa.....	29
<b>Capítulo 2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....</b>	<b>30</b>
<b>Capítulo 3 GEOLOGIA REGIONAL.....</b>	<b>33</b>

3.1 Secuencia litológica.....	35
3.1.1.- Basamento sedimentario.....	35
3.1.2.- Rocas volcánicas. ....	36
3.1.3.- Rocas volcánicas pre-Ignimbríticas (Unidad E).....	36
3.1.4.- Secuencias Ignimbríticas (Unidad D).....	37
3.1.4.1 Ignimbrita San Francisco.....	37
3.1.4.2 Miembro San Antonio.....	37
3.1.4.3 Miembro Atengo. ....	38
3.1.5.- Toba Don Guinyó. ....	38
3.1.6.- Volcanismo post-ignimbrítico (Unidad C).....	39
3.1.7.- Domos dacíticos resurgentes (Unidad B). ....	40
3.1.8.- Volcanismo Plio-Cuaternario (Unidad A).....	41
3.1.9.- Depositos aluviales. ....	42
<b>Capítulo 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>44</b>
4.1 ETAPA 1. Caracterización del material geológico residual. ....	46
4.1.1.- Muestreo en campo.....	46
4.1.2.- Laboratorio. ....	46
4.2 ETAPA 2. Métodos de análisis para la caracterización mineralógica, química y física del material geológico residual y los adhesivos comerciales. ....	48
4.2.1.- Difracción de rayos X.....	48
4.2.2.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	49
4.2.3.- Análisis de Tamaño de Partícula (ATP). ....	51
4.2.4.- Plasma acoplado por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-MS)...	52
4.2.5.- Propiedades físicas del material geológico residual. ....	54
4.2.5.1 Pesos Volumétricos ..... 54	
4.2.5.2 Determinación de la masa volumétrica compactada (Pesos volumétricos compactos). ....	58
4.2.5.3 Determinación de la masa volumétrica suelta (PVS).....	59
4.2.5.4 Pesos Específicos (Uso de Picnómetro).....	59
4.2.5.5 Granulometría. ....	60
4.2.6.- Propiedades en el estado fresco. ....	65
4.2.6.1 Determinación de la fluidez.....	65
4.2.6.2 Tiempo Abierto. ....	66
4.2.7.- Propiedades en estado sólido.....	70
4.2.7.1 Resistencia a la compresión.....	76
4.2.7.2 Resistencia a la tensión en función al tiempo (Resistencia a la adherencia).....	79
4.3 ETAPA 3. Desarrollo de cuatro nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos propuestos como alternativa tecnológica sustentable.....	83
4.4 ETAPA 4.- Adición de microesferas de aluminosilicato y aditivos para mejora sus propiedades. ....	83

4.5 ETAPA 5.- Evaluación y comparación de resultados.....	84
<b>Capítulo 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b> .....	<b>85</b>
5.1 Etapa 1 y 2. Caracterización mineralógica y química del material geológico residual. ....	85
5.1.1.- Difracción de Rayos X. ....	85
5.1.2.- Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms). ....	86
5.1.3.- Análisis de Tamaño de Partícula (ATP). ....	89
5.1.4.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	91
5.2 Etapa 3. Desarrollo y caracterización de cuatro nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos. ....	93
5.3 Caracterización de formulaciones propias. ....	94
5.3.1.- Efecto de los componentes en las propiedades físicas. ....	94
5.3.1.1 <i>Pesos volumétricos.</i> ....	94
5.3.1.2 <i>Pesos específicos.</i> ....	94
5.3.2.- Efecto de los componentes en estado fresco. ....	95
5.3.2.1 <i>Efecto de los componentes en la fluidez.</i> .....	95
5.3.2.2 <i>Efecto de los componentes en tiempos abiertos.</i> ....	96
5.4 Etapa 4.- Adición de microesferas de aluminosilicato y aditivos. ....	97
5.4.1.- Efecto de los componentes en las propiedades en estado sólido. ....	97
5.4.1.1 <i>Efecto en la resistencia a la adherencia y a la compresión.</i> ....	97
5.5 Etapa 5 Caracterización de adhesivos comerciales. ....	98
5.5.1.- Determinación de la granulometría de acuerdo a Norma NMX-C-077-1997-ONNCCE.....	98
5.5.2.- Determinación de pesos volumétricos sueltos y compactos de acuerdo a Norma NMX-C-073-2004 de las materias primas.....	101
5.5.3.- Determinación del peso específico de acuerdo a la Norma NMX-C-164-ONNCCE-2002. ....	101
5.6 Caracterización en propiedades en estado fresco. ....	102
5.6.1.- Determinación de la fluidez de las mezclas cemento – agua de acuerdo a la Norma NMX –C-144-ONNCCE 2001.....	102
5.6.2.- Determinación del tiempo abierto en estado fresco de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003. ....	103
5.7 Caracterización en propiedades en estado sólido. ....	104
5.7.1.- Determinación de la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003. ....	104
5.7.2.- Determinación de resistencia a la adherencia de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003. ....	106
<b>Capítulo 6 CONCLUSIONES.</b> .....	<b>108</b>
<b>Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un horno.....	21
Figura 2. Proceso de fabricación del cemento.....	25
Figura 3. Fábrica de cemento en Australia, no se aprecian emisiones atmosféricas dañinas.....	28
Figura 4. Mapa de localización de la localidad de Jonacapa municipio de Huichapan Hidalgo.....	33
Figura 5. Localización de la Caldera de Huichapan (H) en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). CVLT= Campo Volcánico de Los Tuxtlas. Las estructuras caldéricas son: 1= La Primavera, 2 = Los Azufres, 3 = Amealco, 4= Mazahua (recientemente descubierta por Anguita <i>et al.</i> , 1991a, b), 5=Huichapan (este estudio), 6= Los Humeros, 7= Chiconquiaco (Negendank <i>et al.</i> , 1985). Modificada de Milán et al 1993.....	34
Figura 6. Mapa geográfico simplificado del área de Huichapan. Se incluye la localización de las muestras recolectadas, donde por simplicidad en los nombres de las muestras eliminan las iniciales HO, HPO ó VA. Modificada de Milán et al 1993.....	35
Figura 7. Bloque esquemático mostrando la morfología de la Caldera de Huichapan. Modificada de Milán et al., 1993.....	36
Figura 8. Disposición esquemática de los miembros que conforman la ignimbrita San Francisco tal como se observa a lo largo de la carretera Huichapan-Tecoautla (Norte de la caldera de Huichapan). Modificada de Milán et al., 1993.....	39
Figura 9. Sección “tipo” del miembro San Antonio de la ignimbrita San Antonio. Modificada de Milán et al., 1993.....	40
Figura 10. Sección “tipo” del miembro Atengo de la ignimbrita San Francisco. Modificada de Milán et al., 1993.....	42
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología experimental que se ha seguido de manera general para la caracterización y análisis de las formulaciones.....	45
Figura 12. A) Esguerrimiento de lodo procedente del proceso de corte y laminado de bloques de roca volcánica. B) Detalle de los polígonos de desecación creados en la presa de lodos al deshidratarse el lodo).....	46
Figura 13. Fotografía del pulverizador <i>FRITSCH PULVERISSETTE 2</i> .....	47
Figura 14. Difractómetro de rayos X marca <i>INEL EQUINOX 2000</i> .....	48

Figura 15. Microscopio Electrónico de Barrido <i>JEOL</i> modelo <i>JMS-6300</i> . .....	49
Figura 16. Analizador de tamaño de partículas <i>Beckman Coulter LS 13320</i> . .....	51
Figura 17. Técnica de ICP-MS. ....	52
Figura 18. Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inducidamente (ICP-MS). ....	53
Figura 19. Tamices. ....	61
Figura 20. Proceso de determinación de la fluidez del mortero. De izquierda a derecha: 1. Equipo de prueba, 2. Vista de planta del molde y plataforma de bronce, 3. Llenado del molde, 4. Retiro de exceso de material, 5. Retiro del molde, 6. Golpeteo de la plataforma y 7. Medición de la extensión del mortero. ....	65
Figura 21. Cuadrícula de material acrílico .....	66
Figura 22. Paleta para mezcladora. ....	75
Figura 23. -Tipos de falla. ....	82
Figura 24. Diagrama TAS ( <i>Total Alkalies vs Silica</i> ) para la clasificación de rocas volcánicas de acuerdo al contenido de $\text{SiO}_2$ y $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ . ....	88
Figura 25. Diagrama de $\text{K}_2\text{O}$ vs $\text{SiO}_2$ % en peso mostrando las tendencias evolutivas, mayores (Wilson, 1991) .....	89
Figura 26. Fotomicrografía de MEB de la toba piroclástica de composición dacítica del Municipio de Huichapan a 200X. ....	91
Figura 27. Fotomicrografía del MEB del adhesivo comercial Sansón blanco Bexel <sup>®</sup> a 250X y 2000X. ....	91
Figura 28. Fotomicrografía de MEB del adhesivo comercial blanco Crest <sup>®</sup> a 200X y 2500X. ....	91
Figura 29. Fotomicrografía de MEB del adhesivo comercial blanco Premier Antideslizamiento Interceramic <sup>®</sup> a 50X y 1000X. ....	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición modal de las rocas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. Modificada de Milán et al., 1993.....	43
Tabla 2. Dimensiones de los recipientes. ....	56
Tabla 3. Masa unitaria del agua a varias temperaturas.....	58
Tabla 4. Selección del tamaño de la muestra de prueba.....	62
Tabla 5. Tiempos Abiertos. ....	68
Tabla 6. Clasificación de piezas cerámicas. ....	69
Tabla 7. Recomendaciones básicas de uso. ....	70
Tabla 8. Cantidades de mezcla adhesiva seca. ....	76
Tabla 9. Resistencia a la compresión. ....	77
Tabla 10. Aplicación de las piezas cerámicas. ....	80
Tabla 11. Resumen de especificaciones. ....	82
Tabla 12. Resumen de especificaciones. ....	83
Tabla 13. Composición porcentual en peso de las formulaciones diseñadas y evaluadas. ....	84
Tabla 14. Del estudio de ICP-Ms de la muestra de roca volcánica proveniente del corte y laminado de cantera para la industria de la construcción. ....	87
Tabla 15. Granulometría de la roca volcánica procedente del corte y laminado de cantera para la industria de la construcción. (Dacita).....	92
Tabla 16. Composición porcentual en peso de las formulaciones diseñadas y evaluadas. ....	93
Tabla 17. Pesos volumétricos sueltos y compactos de los adhesivos desarrollados. ....	94
Tabla 18. Valores de pesos específicos de las formulaciones propias. ....	94
Tabla 19. . Valores de fluidez y tiempos abiertos en formulaciones propias.....	96
Tabla 20. Caracterización de formulaciones propias en estado sólido. Resistencia a la compresión y resistencia a la adherencia.....	98
Tabla 21. Granulometría de adhesivo comercial Sansón Blanco Bexel®.....	99
Tabla 22. Granulometría de adhesivo comercial Blanco Crest®.....	99
Tabla 23. Granulometría de adhesivo comercial Blanco Premier Antideslizante Interceramic®.....	99

Tabla 24. Granulometría de adhesivo comercial Termolita® .....	100
Tabla 25. Pesos Volumétricos sueltos y compactos de los adhesivos comerciales,....	102
Tabla 26. Fluidez y tiempos abiertos de adhesivos comerciales .....	103
Tabla 27. Caracterización de productos comerciales en estado sólido. Resistencia a la compresión, pesos específicos y resistencia a la adherencia. ....	105

## LISTA DE GRAFICAS.

Grafica 1 Difractograma cuantitativo de la muestra de la toba volcánica de la cantera Jonacapa, Mpio. de Huichapan, Hidalgo.....	85
Grafica 2. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial Sansón blanco Bexel <sup>®</sup> teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 206.1 $\mu\text{m}$ .....	89
Grafica 3. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial blanco Crest <sup>®</sup> teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 199.7 $\mu\text{m}$ .....	90
Grafica 4. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial blanco Premier Antideslizamiento Interceramic <sup>®</sup> teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 256.6 $\mu\text{m}$ .....	90
Grafica 5. Granulometría del residuo geológico (polvo de roca volcánica de composición dacítica).....	93
Grafica 6. Granulometría de formulaciones propias. ....	95
Grafica 7. Tiempo abierto en minutos de los adhesivos desarrollados. ....	96
Grafica 8. Granulometría de los adhesivos comerciales. ....	100
Grafica 9. Tiempo abierto de adhesivos comerciales.....	104
Grafica 10. Resistencia a la compresión de adhesivos comerciales a los 7, 14 y 28 días de fraguado. ....	106
Grafica 11. Resistencia a la adherencia en Ibf de los adhesivos comerciales. ....	107

# INTRODUCCIÓN

## **INTRODUCCIÓN.**

En la industria de la cerámica y los recubrimientos se utilizan formulaciones esencialmente con base en cemento gris y blanco, yeso, carbonato de calcio, compuestos celulósicos, wollastonita, polímeros y cloruro de calcio, en distintas proporciones y constituyen el adhesivo a utilizar para fijar las piezas cerámicas que se comercializan en el ramo de la construcción (recubrimientos, acabados, aislamiento térmico, etc.).

El adhesivo que se comercializa nacional e internacionalmente para este fin, por distintos fabricantes es muy importante, debido a que la durabilidad de las piezas cerámicas depende de su calidad, por lo que algunos fabricantes extienden la garantía de uso respecto al tiempo de vida del cerámico.

El costo y tiempo de elaboración de los adhesivos resulta ser muy variable, pero en general es elevado y redundante en la calidad de los mismos (cantidad de cemento blanco y gris empleado principalmente, así como el de las materias primas necesarias para su fabricación (algunas de importación): compuestos celulósicos, polímeros, wollastonita, cloruro de calcio, etc.).

### **Justificación.**

La presente investigación se considera un desarrollo tecnológico innovador debido a que radica en la implementación y combinación de materiales geológicos residuales con microesferas de aluminosilicato que en esta investigación doctoral se proponen como sustitutos al cemento blanco y gris, redundando en nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos, competitivos, económicos, ligeros, con propiedades fisicoquímicas similares a los productos comerciales (llegando a superarlos) sin demeritar la calidad y acabado final deseable.

### **Objetivo general.**

El objetivo de este trabajo es desarrollar nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos utilizando materiales de origen geológico residuales que cumplan con las normas de calidad y especificaciones requeridas por la industria cerámica, además de ser ecológicamente sustentables.

De acuerdo a lo anterior se plantean los siguientes objetivos específicos.

### **Objetivos específicos.**

1. Recopilación bibliográfica exhaustiva sobre adhesivos con base carbonato y silicato de calcio para aportar ideas, clarificar conceptos y posibles dimensiones relacionadas con la formulación de adhesivos cerámicos.
2. Realizar caracterización física, química y mineralógica del material geológico residual propuesto como sustituto del cemento blanco y gris en los adhesivos cerámicos.
3. Diseño y desarrollo de nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos como alternativa tecnológica, sustentable y económica con respecto a los productos que se comercializan actualmente. A de más de ser ecológicamente sustentables.
4. Realizar caracterización física y mecánica de cuatro adhesivos comerciales utilizados en la industria de los cerámicos y recubrimientos, para hacer una comparación de los parámetros y reacciones que tiene lugar proceso de fraguado con los desarrollados en esta investigación.

5. Determinar propiedades físicas y mecánicas de las nuevas formulaciones desarrolladas en esta investigación para analizar las propiedades que se mejoraron en comparación con las comerciales.

La forma de desarrollar y presentar esta investigación es la siguiente: Una introducción en donde se da la justificación seguida del objetivo general y los objetivos específicos. En el Capítulo I, llamado marco teórico, se dan los conceptos más importantes del tema de estudio. En el II de antecedentes se presenta la revisión de los estudios de los adhesivos cerámicos y cementos hechos hasta el momento. En el Capítulo III se describe la geología de la zona de estudio. En el IV se describe el desarrollo experimental de las normas de calidad, así como los equipos experimentales empleados. En el Capítulo IV, se discuten los resultados y finalmente se aportan las conclusiones obtenidas de la presente investigación doctoral.

# Capítulo I. MARCO TEÓRICO

## Capítulo 1 MARCO TEÓRICO.

### 1.1 Cemento.

El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre estas rocas es llamada *clinker*, que se convierte en cemento cuando se le agrega yeso, que le da la propiedad a la mezcla para que pueda fraguar y endurecerse. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón (en España, parte de Sudamérica y los países del Caribe hispano), o concreto (en México, Centroamérica y parte de Sudamérica). (*Gomà. 1979*).

Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente (*Otto. 1985*).

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo (CaO) y de dióxido de silicio reactivo (SiO<sub>2</sub>) será al menos del 50% en masa, cuando las proporciones se determinen conforme con la Norma Europea EN 196-2.

Los cementos están compuestos de diferentes materiales (componentes) que adecuadamente dosificadas mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

De material inorgánico, especialmente seleccionado, usado en proporción superior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes.

De origen arcilloso obtenidos a partir de arcillas y rocas caliza en proporción.

Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

### **1.2 Descripción de los componentes.**

*Caliza (L).*

- $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masa.
- Contenido de arcilla  $< 1.2 \text{ g}/100 \text{ g}$ .
- Contenido de Carbono Orgánico Total (TOC)  $\leq 0.5\%$  en masa.

*Caliza (LL).*

- $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masa.
- Contenido de arcilla  $< 1.2 \text{ g}/100 \text{ g}$ .
- Contenido de Carbono Orgánico Total (TOC)  $\leq 0.2\%$  en masa.

*Cenizas volantes calcáreas (W).*

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. La ceniza volante calcárea es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas.

Composición:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y otros compuestos.

*Cenizas volantes silíceas (V).*

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. La ceniza volante silícea es un polvo fino de partículas esféricas que tiene propiedades puzolánicas.

Composición química:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y otros compuestos.

*Clinker (K).*

El *clinker* de cemento Portland es un material hidráulico que se obtiene por sinterización de una mezcla especificada con precisión de materias primas (crudo, pasta o harina).

Composición química: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros compuestos.

*Clinker Aluminato de Calcio.*

El *clinker* de cemento de aluminato de calcio es un material hidráulico que se obtiene por fusión o sinterización de una mezcla homogénea de materiales aluminosos y calcáreos conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, siendo los principales los óxidos de aluminio, calcio y hierro (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y pequeñas cantidades de óxidos de otros elementos (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, S<sup>-2</sup>, SO<sub>3</sub>, Cl<sup>-</sup>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, etc.). El componente mineralógico fundamental es el aluminato monocálcico (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

*Escoria granulada de horno alto (S).*

La escoria granulada de horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto.

Composición química: CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros compuestos.

*Esquistos calcinados (T).*

El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800° C y finamente molido presenta propiedades hidráulicas pronunciadas, como las del cemento Portland, así como propiedades puzolánicas.

Composición: SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros compuestos.

NOTA: Si el contenido en sulfato  $\text{SO}_4$  del esquisto calcinado excede el límite superior permitido para el contenido de sulfato en el cemento, esto debe tenerse en cuenta por el fabricante del cemento reduciendo convenientemente los constituyentes que contienen sulfato de calcio.

#### *Humo de Sílice (D).*

El humo de sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas.

#### *Puzolana natural (P).*

Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico, o rocas sedimentarias de composición silícea o sílico-aluminosa, o la combinación de ambas, que finamente molidos y en presencia de agua reaccionan para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio, capaces de desarrollar resistencia.

Composición química:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y otros compuestos.

#### *Puzolana natural calcinada (Q).*

Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.

Composición química:  $\text{SiO}_2$  reactivo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y otros compuestos. (Walter, 1977).

### **1.3 Tipos de cemento.**

#### **1.3.1.- Cementos blancos.**

Contrariamente férricos, los cementos blancos tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen por lo tanto un porcentaje bajísimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . El color blanco es debido a la falta del hierro que le da una tonalidad grisácea al Portland

normal y un gris más oscuro al cemento férrico. La reducción del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es compensada con el agregado de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), necesarios en la fase de fabricación en el horno para bajar la calidad del tipo de cemento. Se le suele añadir una cantidad extra de caliza que se le llama clinkerita para rebajar el tipo de cemento. (Walter. 1977).

### 1.3.2.- Cementos de mezclas.

Los cementos de mezclas se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland normal. (Walter. 1977).

### 1.3.3.- Cemento puzolánico.

Se denomina puzolana a una fina ceniza volcánica, su nombre deriva de la localidad de Pozzuoli, en las proximidades de Nápoles.

Mezclada con cal (en la relación de 2 a 1) se comporta como el cemento puzolánico y permite la preparación de una buena mezcla en grado de fraguar incluso bajo agua.

La puzolana es una roca de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente:

- 55-70% de *clinker* Portland.
- 30-45% de puzolana.
- 2-4% de yeso.

Puesto que la puzolana se combina con la cal ( $\text{CaO}$ ), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  está presente solamente en el componente constituido por el *clinker* Portland, la colada de cemento puzolánico desarrollará un menor calor de reacción durante el fraguado. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en

climas particularmente calurosos, o para coladas de grandes dimensiones. (*Walter. 1977*). Se usa principalmente en elementos en las que se necesita alta impermeabilidad y durabilidad.

#### **1.3.4.- Cemento siderúrgico.**

El cemento siderúrgico tiene mala resistencia a las aguas agresivas y desarrolla más calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo rinde particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos. Tiene alta resistencia química, de ácidos y sulfatos y una alta temperatura al fraguar.

#### **1.3.5.- Cemento de fraguado rápido.**

El cemento de fraguado rápido, también conocido como Cemento Romano que se caracteriza por iniciar el fraguado a los pocos minutos de su preparación con agua. Se produce en forma similar al cemento Portland, pero con el horno a una temperatura menor (1,000 a 1,200° C). Es apropiado para trabajos menores, de fijaciones y reparaciones, no es apropiado para grandes obras porque no se dispondría del tiempo para efectuar una buena aplicación. El fraguado aproximadamente a los 15 minutos (a 20° C). La ventaja es que al pasar aproximadamente 180 minutos de iniciado del fraguado, se consigue una resistencia muy alta a la compresión (entre 8 a 10 MPa), por lo que se obtiene gran prestación para trabajos de intervención rápida y definitivos. Hay cementos rápidos que pasados 10 años, obtienen una resistencia a la compresión superior a la de algunos hormigones armados (mayor a 60 MPa). (*Walter. 1977*).

#### **1.3.6.- Cemento aluminoso.**

El cemento aluminoso se produce principalmente a partir de la bauxita con impurezas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Adicionalmente se agrega óxido de calcio o bien carbonato de calcio, calentándose hasta los 1,600° C (estado líquido) enfriándose rápidamente y pasando por un proceso de molido. (*Walter. 1977*). Antes de hidratarse, el cemento aluminoso está compuesto por alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y cal ( $\text{CaO}$ ) ambas al 40%. Se combinan con agua dando aluminato cálcico hidratado.

## 1.4 El cemento Portland.

El cemento Portland es un conglomerante, o cemento hidráulico, que cuando se mezcla con áridos (arenas y gravas), agua y fibras de acero discontinuas y discretas, tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. Es el más usual en la construcción y es utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón (llamado concreto en Latinoamérica). Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. (Walter. 1977).

### 1.4.1.- Fabricación del cemento Portland.

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases:

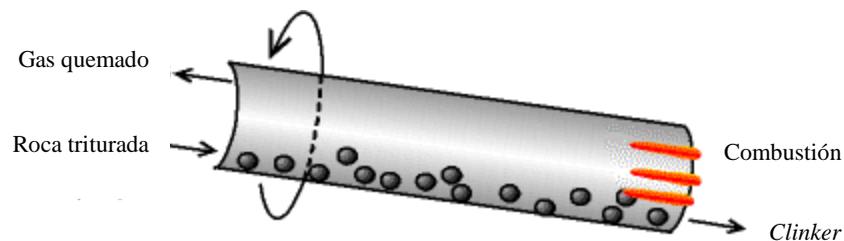
1. Preparación de la mezcla de las materias primas.
2. Producción del *clinker*.
3. Preparación del cemento.

Las materias primas para la producción del portland son minerales que contienen:

- óxido de calcio (44%).
- óxido de silicio (14.5%).
- óxido de aluminio (3.5%).
- óxidos de hierro (3%).
- óxido de manganeso (1.6%).

La extracción de estos minerales se hace en canteras que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica. Con frecuencia los minerales ya tienen la composición deseada; sin embargo, en algunos casos es necesario agregar arcilla, carbonato de calcio, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuales de fundiciones. (Walter. 1977). La mezcla es calentada en un horno especial, con forma de un gran cilindro (llamado *kiln*) dispuesto casi horizontalmente con ligera inclinación, que rota lentamente. La temperatura aumenta a lo largo del cilindro hasta llegar a unos 1400° C, que hace que los minerales se combinen pero sin que se fundan o vitrifiquen. (Véase ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

En la zona de menor temperatura, el carbonato de calcio (calcáreo o caliza) se disocia en óxido de calcio y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio ( $\text{Ca}_2\text{Si}$  y  $\text{Ca}_3\text{Si}$ ). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{Al}$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $\text{Ca}_4\text{AlFe}$ ). El material resultante es denominado **clinker**. (Otto. 1985). El *clinker* puede ser conservado durante años antes de proceder a la producción del cemento, siempre y cuando no entre en contacto con el agua.



**Figura 1. Esquema de un horno.**

La energía necesaria para producir el *clinker* es de unos 1700 J/g, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Provoca una gran demanda de energía para la producción del cemento y, por tanto, la liberación de gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera, que es un gas de efecto invernadero. (Otto. 1985).

Para mejorar las características del producto final del *clinker* se agrega aproximadamente el 2 % de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64% óxido de calcio.
- 21% óxido de silicio.
- 5.5% óxido de aluminio.
- 4.5% óxidos de hierro.
- 2.4% óxido de magnesio.
- 1.6% sulfatos.

- 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

Cuando el cemento Portland se mezcla con agua se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia final característica. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato. (*Otto. 1985*).

El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato tricálcico formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Las tres reacciones generan calor. (*Walter. 1977*).

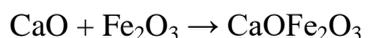
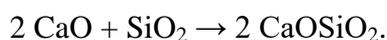
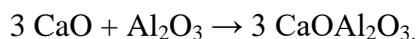
La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

En el 2004, los principales productores mundiales de cemento de Portland fueron Lafarge en Francia, Holcim en Suiza y Cemex en México. (*Gomà. 1979*).

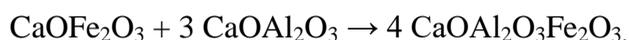
#### **1.4.2.- Reacciones de formación del *clinker*.**

Las reacciones de la formación del *clinker*, por fases de temperatura, son:

De 1000 a 1100° C.



De 1100 a 1200° C.



De 1250 a 1480° C.



La composición final será:

- 51%  $\text{CaOSiO}_2$ .
- 26%  $\text{CaOSiO}$ .
- 11%  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ .
- 12 %  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### 1.4.2.1 Función del yeso.

El yeso se agrega generalmente al *clinker* para regular el fraguado. Su presencia hace que el fraguado se concluya aproximadamente en 45 minutos. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico para formar una sal expansiva llamada estringita.  
 $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 + 3\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . (Gomà. 1979).

#### 1.4.2.2 Módulos.

Los módulos son valores característicos de cada cemento o cal, que permiten conocer en qué relación se encuentran, porcentualmente, los diversos componentes en el producto final.

Para el cemento Portland se tiene:

*Módulo hidráulico.*

$$Mi \frac{\%CaO}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 + \%SiO_2} = 1.7 - 2.3$$

*Módulo de silicatos.*

$$Mx \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} = 1.9 - 3.2$$

*Módulo silícico.*

$$M_c = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3} = 2.5 - 3.5$$

*Módulo de alúmina.*

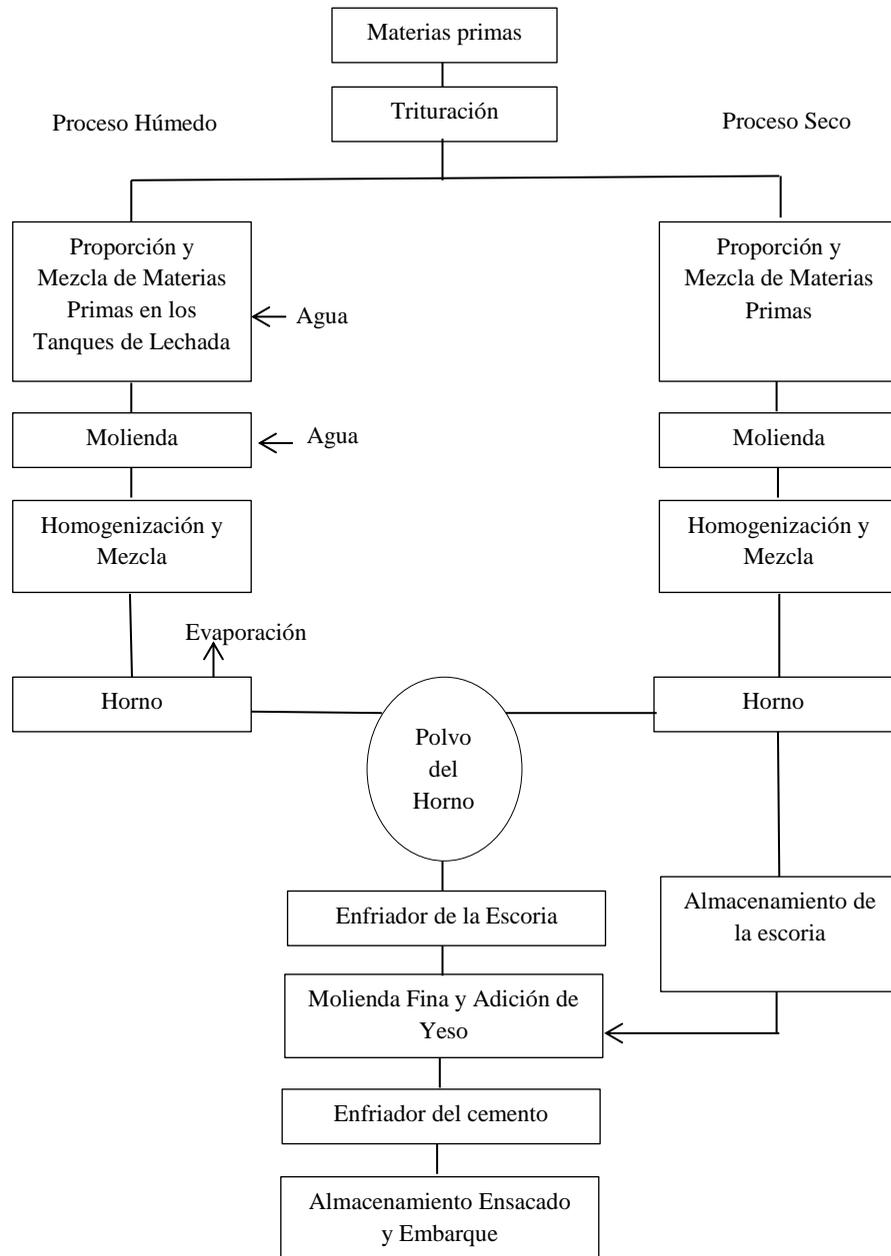
$$M_f = \frac{Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} 1.5 - 2.5$$

Los mejores cementos férricos son los que tienen un módulo calcáreo bajo, contienen una menor cantidad de  $3CaOSiO_2$ , cuya hidratación produce la mayor cantidad de cal libre  $[Ca(OH)_2]$ . (Gomà. 1979)

Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación del cemento comprende cuatro etapas principales:

1. Extracción y molienda de la materia prima.
2. Homogeneización de la materia prima.
3. Producción del *Clinker*.
4. Molienda de cemento.



**Figura 2. Proceso de fabricación del cemento.**

La materia prima para la elaboración del cemento (caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso) se extrae de canteras o minas y dependiendo de la dureza y ubicación del material, se aplican ciertos sistemas de explotación y equipos. Una vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo. La etapa de homogeneización puede ser por vía húmeda o por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales. En el proceso húmedo la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de

homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el *clinker* a temperaturas superiores a los 1,500° C. En el proceso seco, la materia prima es homogeneizada en patios de materia prima con el uso de maquinarias especiales. (Otto, 1985). En este proceso el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el *clinker* requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas. (Véase).

El *clinker* obtenido, independientemente del proceso utilizado en la etapa de homogeneización, es luego molido con pequeñas cantidades de yeso para finalmente obtener cemento.

### **1.5 Reacción de las partículas de cemento con el agua.**

1. *Periodo inicial*: las partículas con el agua se encuentran en estado de disolución, existiendo una intensa reacción exotérmica inicial. Dura aproximadamente diez minutos.
2. *Periodo durmiente*: en las partículas se produce una película gelatinosa, la cual inhibe la hidratación del material durante una hora aproximadamente.
3. *Inicio de rigidez*: al continuar la hidratación de las partículas de cemento, la película gelatinosa comienza a crecer, generando puntos de contacto entre las partículas, las cuales en conjunto inmovilizan la masa de cemento. También se le llama fraguado. Por lo tanto, el fraguado sería el aumento de la viscosidad de una mezcla de cemento con agua.
4. *Ganancia de resistencia*: al continuar la hidratación de las partículas de cemento, y en presencia de cristales de  $\text{CaOH}_2$ , la película gelatinosa (la cual está saturada en este punto) desarrolla unos filamentos tubulares llamados agujas fusiformes, que al aumentar en número generan una trama que aumenta la resistencia mecánica entre los granos de cemento ya hidratados.

5. *Fraguado y endurecimiento*: el principio de fraguado es el tiempo de una pasta de cemento de difícil moldeado y de alta viscosidad. Luego la pasta se endurece y se transforma en un sólido resistente que no puede ser deformado. El tiempo en el que alcanza este estado se llama final de fraguado. (*Gomà. 1979*).

### **1.6 Almacenamiento.**

Si es cemento en sacos deberá almacenarse sobre parrillas de madera o piso de tablas; no se apilará en hileras superpuestas de más de 14 sacos de altura para almacenamiento de 30 días, ni de más de 7 sacos de altura para almacenamientos hasta de 2 meses. Para evitar que el cemento envejezca indebidamente, después de llegar al área de las obras, el contratista deberá utilizarlo en la misma secuencia cronológica de su llegada. No se utilizará bolsa alguna de cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento en el área de las obras, salvo que nuevos ensayos demuestren que está en condiciones satisfactorias. (*Otto.1985*).

### **1.7 Impacto ambiental de la industria del cemento.**

La industria del cemento incluye las instalaciones con hornos que emplean el proceso húmedo o seco para producir cemento de roca caliza y las que emplean agregado liviano para producirlo a partir de esquisto o pizarra. Se utilizan hornos giratorios que elevan los materiales a temperaturas de 1,400° C. Las materias primas principales son roca caliza, arena de sílice, arcilla, esquisto, marga y óxidos. Se agrega sílice, aluminio y hierro en forma de arena, arcilla, bauxita, esquisto, mineral de hierro y escoria de alto horno. Se introduce yeso durante la fase final del proceso. La tecnología de hornos de cemento se emplea en todo el mundo. (*Walter.1977*).

#### **1.7.1.- Impactos ambientales potenciales.**

Las plantas de cemento pueden tener impactos ambientales positivos en lo que se relaciona con el manejo de los desechos, la tecnología y el proceso son muy apropiados para la reutilización o destrucción de una variedad de materiales residuales, incluyendo algunos desperdicios peligrosos. Asimismo, el polvo del horno que no se puede reciclar

en la planta sirve para tratar los suelos, neutralizar los efluentes ácidos de las minas, estabilizar los desechos peligrosos o como relleno para el asfalto. (Véase Figura 3).

Los impactos ambientales negativos de las operaciones de cemento ocurren en las siguientes áreas del proceso: manejo y almacenamiento de los materiales (partículas), molienda (partículas), y emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria (partículas o "polvo del horno", gases de combustión que contienen monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno). Los contaminantes hídricos se encuentran en los derrames del material de alimentación del horno (alto pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, principalmente potasio y sulfato), y el agua de enfriamiento del proceso (calor residual). El escurrimiento y el líquido lixiviado de las áreas de almacenamiento de los materiales y de eliminación de los desechos puede ser una fuente de contaminantes para las aguas superficiales y freáticas (Walter.1977).



**Figura 3. Fábrica de cemento en Australia, no se aprecian emisiones atmosféricas dañinas.**

### **1.7.2.- Emisiones de partículas a la atmósfera.**

La fabricación de cemento incluye el transporte de materiales polvorientos o pulverizados desde la cantera de piedra caliza, hasta el embarque del producto terminado para envío. Las partículas son la causa más importante del impacto ambiental negativo. Los precipitadores electrostáticos, o los filtros de bolsa, constituyen un requerimiento rutinario para controlar las emisiones de partículas de los hornos. (Walter.1977). El control del polvo que resulta del transporte de los materiales es uno

de los desafíos más difíciles; las bandas transportadoras, pilas de acopio y caminos de la planta pueden ser causas más importantes de degradación de la calidad del aire, que las emisiones del molino y el horno. Se deben emplear recolectores mecánicos de polvo donde sea práctico, por ejemplo, en los trituradores, transportadores y el sistema de carga. En la mayoría de los casos, el polvo recolectado puede ser reciclado, reduciendo el costo y disminuyendo la producción de desechos sólidos. Se puede mantener limpios los camiones de la planta con aspiradoras y/o rociadores, a fin de eliminar el polvo atmosférico causado por el tráfico y el viento. Deben ser cubiertas las pilas de acopio tanto como sea posible. Los camiones que transportan materiales a la planta y fuera de ésta deben tener carpas y límites de velocidad.

### **1.8 Normativa.**

La normalización es la actividad que pretende desarrollar un proceso por el cual se unifican criterios respecto a determinadas materias y se posibilita la utilización de un lenguaje común en un campo de actividad concreto.

Las conclusiones de un proceso de normalización se plasman en un documento técnico denominado "norma", mediante el cual fabricantes, consumidores y Administración conocen las características técnicas mínimas exigibles que deberían cumplir un producto o servicio.

Las normas son siempre documentos cuya aplicación es de carácter voluntario y sólo se convierten en obligatorias cuando así lo estipula la reglamentación oficial, como ocurre en el caso del cemento.

La calidad del cemento portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150. En Europa debe estar de acuerdo con la norma EN 197-1. En España los cementos vienen regulados por la Instrucción para recepción de cementos RC-08, fue aprobada por el Real Decreto 956/2008 del 6 de junio.

Capítulo II.

ANTECEDENTES

HISTORICOS

## Capítulo 2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

Hace 5,000 años aparecen al norte de Chile las primeras obras de roca unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas, estas obras formaban las paredes de las chozas utilizadas por los indios.

Los egipcios emplearon morteros de yeso y de cal en sus construcciones monumentales.

En Troya y Micenas se emplearon piedras unidas por arcilla para construir muros, pero realmente el hormigón confeccionado con un mínimo de técnica aparece en unas bóvedas construidas cien años antes de J.C.

Los Romanos dieron un paso importante al descubrir un cemento que fabricaban mezclando cenizas volcánicas con cal viva. En Puteoli conocido hoy como Pozzuoli se encontraba un depósito de estas cenizas, de aquí que a este cemento se le llamase "Cemento de Puzolana".

Hasta el siglo XVIII puede decirse que los únicos conglomerantes empleados en la construcción fueron los yesos y las cales hidráulicas, sin embargo, es durante este siglo cuando se despierta un interés notable por el conocimiento de los cementos.

John Smeaton, ingeniero de Yorkshire (Inglaterra), al reconstruir en 1758 el faro de Eddystone en la costa de Cornwall, se encuentra con que los morteros formados por la adición de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción de las aguas marinas y que la presencia de arcilla en las cales, no sólo las perjudicaba sino que por el contrario, las mejoraba, haciendo que estas cales fraguasen bajo el agua y que una vez endurecidas fuesen insolubles en ella.

En 1824, Joseph Aspdin, un constructor de Leeds en Inglaterra, daba el nombre de cemento portland 1824 denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland y patentaba un material pulverulento que amasado con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción.

En 1838 Brunel emplea por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sinterización por elección de una temperatura adecuada de cocción. Este cemento se aplicó en la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres.

Puede decirse que el prototipo del cemento moderno fue producido a escala industrial por Isaac Johnson quien en 1845 logra conseguir temperaturas suficientemente altas para *clinkerizar* a la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

Puede decirse con acierto que el primer padre del cemento fue Vicat a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad y que propuso en 1817. Vicat fue un gran investigador y divulgador de sus trabajos; en 1818 publicó su "*Recherches Experimentales*" y en 1828 "*Mortiers et Ciments Calcaires*". En estos trabajos marca la pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. El sistema de fabricación que empleó Vicat fue el de vía húmeda y con él marcó el inicio del actual proceso de fabricación. Este gran científico en 1853 empieza a estudiar la acción destructiva del agua de mar sobre el mortero y hormigón.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc., en la segunda mitad del siglo XIX, da una importancia enorme al cemento y las fábricas de éste, especialmente las de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier.

Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales.

Actualmente, el cemento Portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Se puede decir que el cemento es el alma del hormigón estando destinada, prácticamente toda su producción a enlazar rocas sueltas para crear el material pétreo que conocemos como hormigón.

En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino

tubular y los métodos de transportar hormigón fresco ideados por Juergen Heinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907

Capítulo III. GEOLOGIA  
REGIONAL

### Capítulo 3 GEOLOGIA REGIONAL.

Huichapan es una ciudad ubicada en el Estado de Hidalgo en la República Mexicana. El nombre deriva de las raíces nahuas *Huexoapan huexotl*, "sauce"; y *atl*, «río» que significa «ríos de los sauces». Sin embargo, de acuerdo con algunos historiadores, los toltecas que se asentaron en esta zona, la nombraron *Hueychapan* que significa «abundancia de agua».

Localizada al oeste del estado de Hidalgo, colinda al norte con el municipio de Tecozautla, al sur con los municipios de Nopala de Villagrán y Chapantongo, y al oeste con el Estado de Querétaro.

El municipio de Huichapan se localiza dentro de las coordenadas geográficas latitud 20.3747 y longitud -99.6505 a una mediana altura de 2,100 metros sobre el nivel del mar, por lo que el territorio es caracterizado por estar localizado en una parte de la planicie en donde debido a las irregularidades de la tierra es posible observar una región montañosa. (Véase Figura 4).

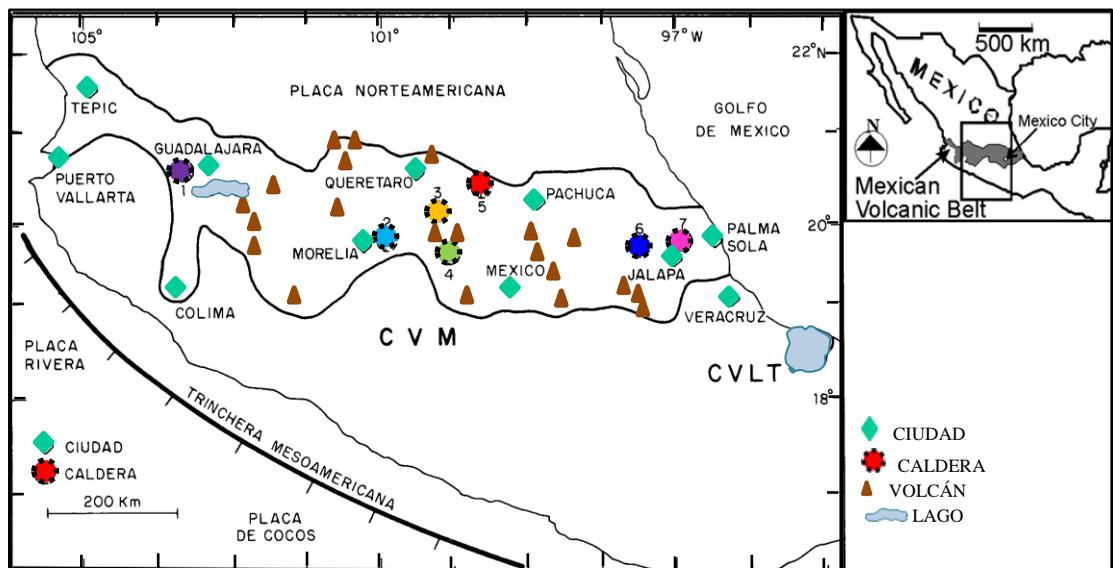


**Figura 4.** Mapa de localización de la localidad de Jonacapa municipio de Huichapan Hidalgo.

La Caldera de Huichapan es la estructura volcánica fuente de los materiales volcánicos (tobas, ignimbritas y derrames) donde se establecen las canteras de roca dimensional que se comercializa local y regionalmente. Ésta se ubica en el sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) y al occidente del Estado de Hidalgo. Dista unos 110 km al NNW de la Ciudad de México. (Véase Figura 5).

Este aparato volcánico tiene una forma subcircular de aproximadamente 8.5 km de diámetro y un volumen aproximado de 65 km<sup>3</sup> (Milán y Carrasco-Núñez 1988) (Véase Figura 6). La estructura central queda bordeada por un alto topográfico constituido por la acumulación de los derrames andesíticos emitidos desde el anillo de colapso. En el interior de este último, se levanta el domo Hualtepec con 300 msnm (Véase Figura 7). Las características litológicas de las unidades aflorantes dentro, y en el entorno de la estructura aquí descrita, se presentan a continuación:

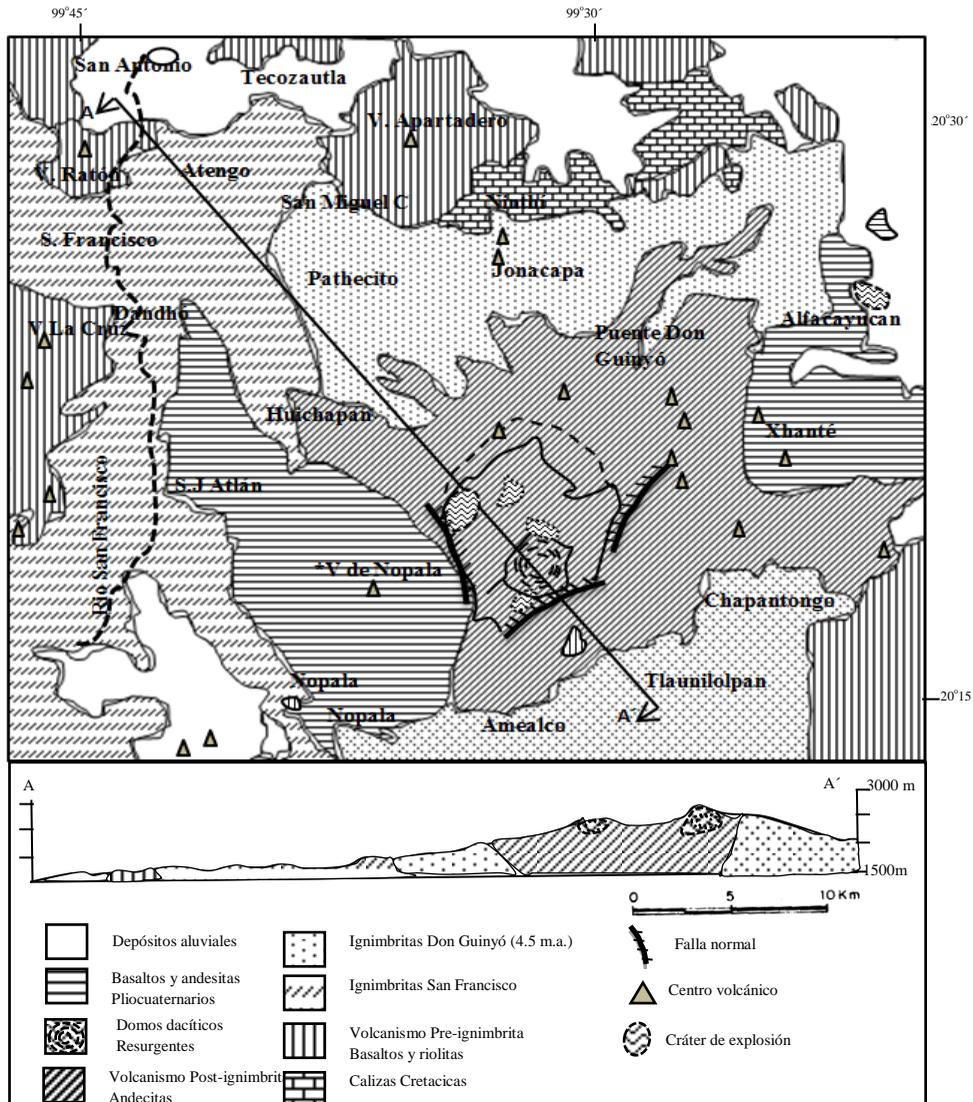
La geología del área se distingue por presentar una secuencia volcánica que descansa sobre calizas del Cretácico Medio y Superior, aflorante al norte de la caldera (Caliza El Doctor, Cuesta del Cura y Soyatal). Tanto la Caliza El Doctor como la Formación Cuesta del Cura afloran en los alrededores del poblado Ninthí y a 7 km al ENE del puente Don Guinyó. La primera se identifica por su espesor masivo y contenido faunístico abundante, entre el cual sobresalen miliólidos multicamerados, pelecípodos y gasterópodos.



**Figura 5. Localización de la Caldera de Huichapan (H) en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). CVLT= Campo Volcánico de Los Tuxtlas. Las estructuras caldéricas son: 1= La Primavera, 2 = Los Azufres, 3 = Amealco, 4= Mazahua (recientemente descubierta por Anguita *et al.*, 1991a, b), 5=Huichapan (este estudio), 6= Los Humeros, 7= Chiconquiaco (Negendank *et al.*, 1985). Modificada de Milán *et al* 1993.**

3.1 Secuencia litológica.

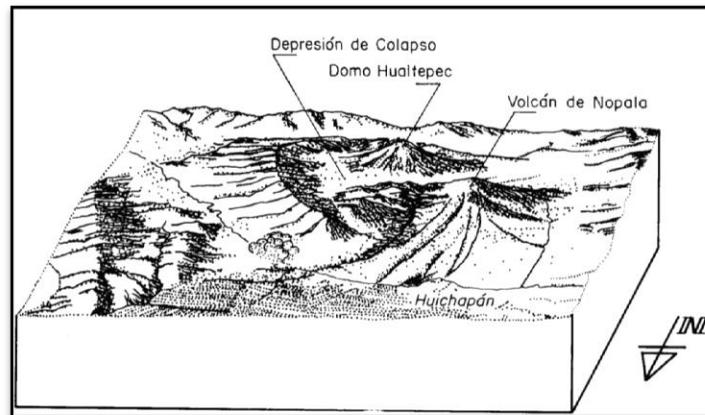
3.1.1.- Basamento sedimentario.



**Figura 6.** Mapa geográfico simplificado del área de Huichapan. Se incluye la localización de las muestras recolectadas, donde por simplicidad en los nombres de las muestras eliminan las iniciales HO, HPO ó VA. Modificada de Milán et al 1993.

La Caliza El Doctor litológicamente varía de *wackestone* a *packstone* y la Cuesta del Cura está constituida por paquetes de 0.5 a 1 m de espesor, cuya litología varía de *mudstone* a *wackestone* con ocasionales nódulos y lentes de pedernal. Esta unidad predomina en la zona de Ninthí, tal y como lo exponen Ortuño-Arzate (1981) y Milán

(1982). Por último, la Formación Soyatal (Cretácico Superior) aflora al norte de la comunidad Ninthí y se reconoce con facilidad por su litología compuesta principalmente de lutita, arenisca y marga de coloración marrón y verdoso en estratos delgados y alternantes entre sí (Ortuño-Arzate, 1981; Milán, 1982). Estas rocas se encuentran plegadas y forman pequeñas estructuras recumbentes con ejes de dirección Este-Oeste; no obstante, la tendencia regional de los pliegues es en dirección NNW-SSE (Seggerström, 1961).



**Figura 7. Bloque esquemático mostrando la morfología de la Caldera de Huichapan. Modificada de Milán et al., 1993.**

### **3.1.2.- Rocas volcánicas.**

Sobre esta secuencia sedimentaria plegada descansa las rocas volcánicas del Terciario, constituidas por dos paquetes principales: el Grupo San Juan, del Mioceno-Plioceno y las rocas del Plioceno generadas durante la evolución y formación de la Caldera de Huichapan.

La descripción geológica de la serie volcánica de esta región están organizadas en cinco unidades (E-A), en orden decreciente en edad, en la misma forma que se hizo para la Caldera de Amealco (Verma et al., 1991a).

### **3.1.3.- Rocas volcánicas pre-Ignimbríticas (Unidad E).**

En este variado conjunto litológico se encuentran las rocas que constituyen el grupo San Juan (Wilson et al., 1995 citado en Segerström, 1961) constituido por tobas, basaltos y

riolitas que afloran a 30 Km al norte de la caldera de Huichapan en la zona de Tecozautla - Río San Juan (Milán y Herrera, 1987; Milán et al., 1988). En el área adyacente al Pozo Geotérmico Pathé, Nichols (1970) y después Milán (1982) reportan edades de entre 6 y 7 Ma para las rocas de esta unidad. Otras rocas cubiertas por los depósitos ignimbríticos de la caldera comprenden los basaltos de los volcanes denominados Apartadero, La Cruz y el Ratón, también considerados por Milán y Herrera (1987) como pertenecientes al grupo San Juan. En el primero de ellos, Milán (1982) reporta una edad de 9 Ma. De igual modo al norte de Jonacapa, la ignimbrita Don Guinyó cubrió parcialmente dos pequeños conos andesíticos, uno de los cuales se encuentra emplazado sobre las calizas del Cretácico. Los afloramientos pre-caldéricos más cercanos a la zona de colapso se localizan en las inmediaciones del poblado de Nopala y al NE de Amealco (Hidalgo). Estos consisten en riolitas desvitrificadas, muy parecidas a las que afloran en las inmediaciones de Pathé (Milán, 1982) y a las riolitas del campo de Oxthoc (Milán et al., 1988) aflorantes a 10 km al sur de Amealco.

### **3.1.4.- Secuencias Ignimbríticas (Unidad D).**

Estas secuencias incluyen a las ignimbritas San Francisco y Don Guinyó las cuales se describen a continuación.

#### **3.1.4.1 Ignimbrita San Francisco.**

Esta unidad aflora a todo lo largo del río San Francisco y puede dividirse claramente en dos miembros: el Miembro San Antonio y el Miembro Atengo (*Véase Figura 7*).

#### **3.1.4.2 Miembro San Antonio.**

Este Miembro aflora en el escarpe visible al sur de Tecozautla, el cual se extiende al poniente, casi paralelo a la carretera hasta San Antonio. Entre Atengo y San Antonio, la secuencia es cortada, casi en su totalidad, por el río San Francisco. La sección “tipo” de este miembro se levantó sobre el escarpe denominado “La Cruz de Piedra”, ubicado a escasos 2 km al poniente de Tecozautla. Esta secuencia está compuesta de varias capas Ignimbríticas no soldadas, separadas por horizontes volcano-sedimentarios constituidos por pumicitas de caída libre, a veces depositada y movilizada en medios acuosos. Así mismo, se logran observar algunos horizontes conglomeráticos mal cementados o débilmente empacados en una matriz limosa. Hacia la base de la secuencia observada, se aprecian horizontes ignimbríticos con lentes de gravas, interestratificados con

horizontes de arenas gruesas y gravillas de estratificación cruzada. Este rasgo parece ser de origen sedimentario, no obstante, en san Antonio se aprecian algunos horizontes típicos de

encia basal (*base surge*). Toda la secuencia se encuentra coronada por una ignimbrita oscura, parcialmente soldada y medianamente consolidada, la cual protege a toda la secuencia inferior consolidada, la cual protege a todas las secuencias inferiores de la erosión; denomina Capa Tecozautla.

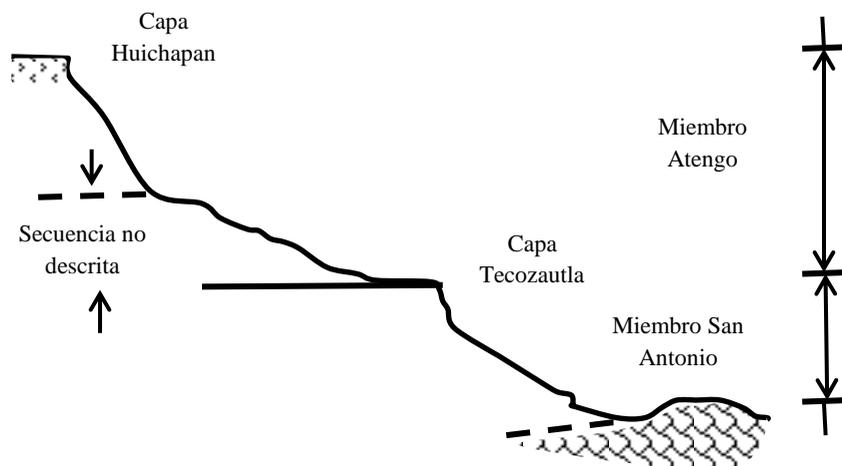
#### 3.1.4.3 *Miembro Atengo.*

La secuencia correspondiente con este miembro aflora en el escarpe de las minas de arena de Atengo y corresponde a la sección “tipo” de la *Figura 10*. Como puede apreciarse en la base de la sección, descansa una secuencia de arenas líticas gruesas con estratificación cruzada, constituidas por abundantes fragmentos de andesitas y basaltos, con algunos horizontes también arenosos de caída libre. Hacia la parte media de este perfil, la presencia de estos horizontes disminuye y aparecen algunas capas ignimbríticas no soldadas con abundantes fragmentos de pómez. Interdigitadas con las ignimbritas se observan algunas capas arenosas de caída libre con estratificación gradual y otras de surgencia basal con estratificación cruzada. En la parte media superior predominan las capas ignimbríticas. La porción superior de la secuencia se caracteriza por presentar en la base una secuencia pumicítica arenosa de caída libre, sobre la cual descansan dos paquetes ignimbríticos: el inferior de composición pumicítica y no soldada, mientras que el superior denominado Capa Huichapan, se presenta soldado y con fracturamiento columnar. Esta capa por su espesor, fracturamiento columnar y resistencia la erosión sobresale de cualquiera de las que conforman la secuencia tobácea.

#### 3.1.5.- **Toba Don Guinyó.**

Seegerström (1961) definió inicialmente a esta unidad, bajo el puente Don Guinyó, como: “*tobas y brechas riolíticas y dacitas bien endurecidas y con lentes horizontales de vidrio negro*”. Esta definición indica claramente que se trata de una secuencia ignimbrítica construida por varias unidades de enfriamiento mayoritariamente soldadas,

que forman capas muy compactas de color rojizo, donde abundan los *fiammes* de color negro. A pesar de predominar las capas soldadas en el arroyo Pathecito, se logran identificar varias unidades no soldadas pero compactas, donde sobresalen los fragmentos de pómez en una matriz de ceniza fina. En general, las distintas capas soldadas y no soldadas contienen fragmentos líticos de composición riolítica y andesítica; petrográficamente, están constituidas por fragmentos cristalinos de feldespato y cuarzo. A pesar de distinguirse bastante bien ambas ignimbritas, Don Guinyó y San Francisco, no ha sido posible observar la relación que guardan entre sí. Nichols (1970) describe el contacto en la zona de Boyé, a 3 km al NE de Huichapan sobre la carretera. Sin embargo, toma una muestra de la toba Don Guinyó y realizó dos determinaciones de edad, obteniéndose valores de  $4.5 \pm 0.3$  Ma y  $4.3 \pm 0.3$  Ma para la edad de esta unidad ignimbrítica.



**Figura 8.** Disposición esquemática de los miembros que conforman la ignimbrita San Francisco tal como se observa a lo largo de la carretera Huichapan-Tecoautla (Norte de la caldera de Huichapan). Modificada de Milán et al., 1993.

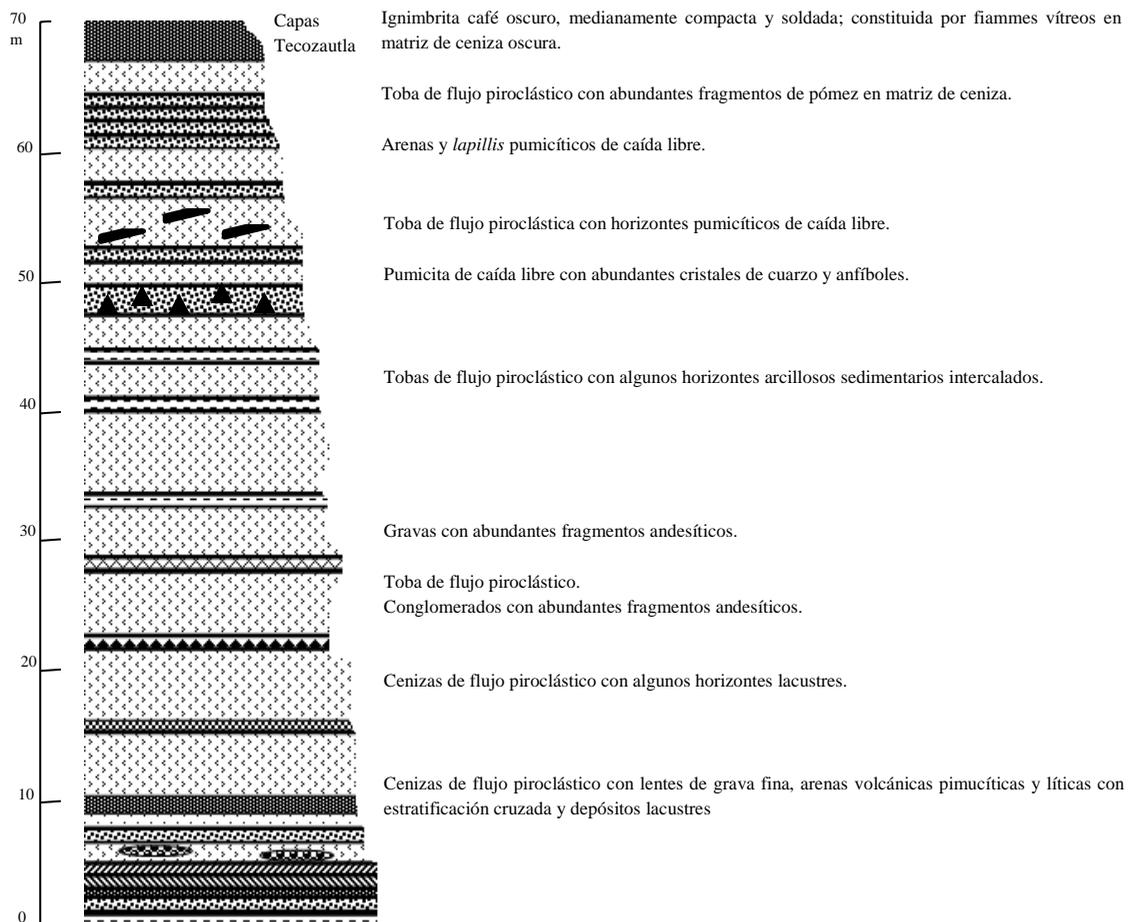
### 3.1.6.- Volcanismo post-ignimbrítico (Unidad C).

Esta unidad comprende la secuencia de andesitas y basaltos emitidos desde varios centros volcánicos, algunos de ellos emplazados en el borde de colapso de la caldera. En términos generales las rocas presentan textura afanítica de color gris oscuro y estructura compacta y vesicular. Poseen fenocristales de andesina y augita en una mesostasis de plagioclasas y piroxenos. Estas rocas se presentan en flujos de enfriamiento de 2 a 5 m de espesor con un mayor apilamiento de estos flujos en los bordes de la caldera, donde pueden alcanzar más de 100 m de espesor. Por su posición estratigráfica sobre la

secuencia ignimbrítica y bajo los basaltos y andesitas del volcán de Nopala, se les asigna una edad Plioceno tardío.

**3.1.7.- Domos dacíticos resurgentes (Unidad B).**

Dentro de este conjunto de rocas, se agrupan las emisiones félsicas de los domos Hualtepec y La Gerja. El primero, localizado cerca de la falla sur del borde del borde de colapso, es el mayor en cuanto a dimensiones y por lo mismo, sobresale desde cualquier ángulo por el que se observa la caldera. La altitud del domo Hualtepec es comparable a la del volcán de Nopala. Está constituido por rocas porfídicas en las que abundan las plagioclasas (An<sub>45-50</sub>) y piroxeno. En general la unidad es muy uniforme y se levanta sobre un derrame de andesitas post - caldéricas. Por otro lado, al norte de depresión caldérica se emplazaron dos domos de esta unidades son de color rosado y se encuentran alterados por intemperismo. La petrografía de una muestra tomada cerca de la hacienda indica que se trata de una riolita esferulítica. Por su posición respecto a las andesinas post-caldéricas donde estos domos resurgentes parecen haberse emplazado contemporáneamente y por lo mismo se les asigna un a edad Plioceno tardío.

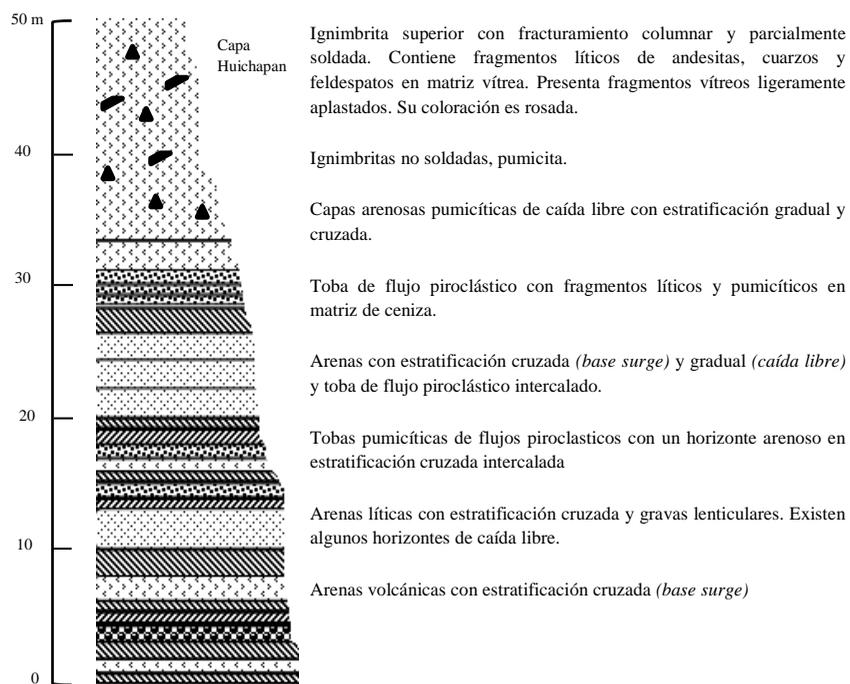


**Figura 9. Sección “tipo” del miembro San Antonio de la ignimbrita San Antonio. Modificada de Milán et al., 1993.**

**3.1.8.- Volcanismo Plio-Cuaternario (Unidad A).**

Las rocas pertenecientes a esta unidad quedan expuestas tanto al oriente (Volcán Xothé) como al poniente (Volcán de Nopala) de la depresión de colapso. A este volcanismo se le ha considerado como volcanismo periférico. Corresponden con basaltos de olivino y andesitas basálticas de piroxeno emitidas en forma de derrames lávicos. Las emisiones del Volcan Nopala se vieron parcialmente sobre el borde occidental de la zona de colapso, pero su máximo alcance llegó a 17 Km al NE del centro de emisión (E de Dandhó, (

). Cubriendo un sector amplio de la ignimbrita San Francisco y de los basaltos del Volcan Xothé tuvieron alcances máximos de 10 Km, canalizados por un patrón de drenaje pre - existente y cubriendo la ignimbrita Don Guinyó y a los basaltos pre - caldéricos. Por su posición estratigráfica y morfología bien conservada, estos volcanes se han considerado como Plio - Cuaternarios y representan la última fase volcánica relacionada con la Caldera de Huichapan.



**Figura 10. Sección “tipo” del miembro Atengo de la ignimbrita San Francisco. Modificada de Milán et al., 1993.**

### 3.1.9.- Depositos aluviales.

El interior de la caldera está cubierta por un paquete limo arcilloso aluvial, reflejo de inundaciones periódicas en el interior de la caldera. Por esto mismo, no se descartan que en niveles más profundos estas secuencias se encuentren descansando sobre un paquete lacustre posterior al emplazamiento de los domos félsicos. Yáñez (1984) reporta la presencia de estos paquetes lacustres en el interior de la caldera.

Una síntesis de los datos petrográficos y la clasificación correspondiente se presenta en la

*Tabla 1.* Dos muestras de rocas pre-ignimbritas (Unidad E) corresponden con basaltos y riolitas con textura microlítica y esferulítica respectivamente. Las rocas de las secuencias ignimbríticas (Unidad D) tienen una textura piroclástica. El vulcanismo post-ignimbrítico (Unidad C) varía de basalto a andesita con diversas texturas. Por su parte, aunque petrográficamente dos de las muestras de los domos resurgentes (Unidad B) parecen ser andesitas pero químicamente corresponden a dacitas (

*Tabla 1).* Finalmente, el vulcanismo Plio-Cuaternario (Unidad A) comprende rocas que varían de basaltos a andesitas con texturas también variables. En su mineralogía modal dominan la plagioclasa y el piroxeno que son los que siguen en importancia (

*Tabla 1).*

La evolución de la Caldera de Huichapan es similar a la de la vecina Caldera de Amealco. Las rocas de la Caldera de Huichapan pertenecen a las series calco - alcalina y calco - alcalina con K alto y varían de andesitas basálticas a riolitas. En sus elementos mayores las muestras de esta caldera muestran características similares a las de Amealco, lo cual es concordante con lo descrito por Milán y Carrasco - Núñez (1988), quienes proponen la formación de ambas calderas bajo condiciones geológicas similares.

**Tabla 1. Composición modal de las rocas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. Modificada de Milán et al., 1993.**

UNIDAD	FENOCRISTALES					MESOSTASIS							TEXTURA	CLASIFICACION
	OL	OPX	CPX	FK	Q	PL	MG	FR	PL	VDR	PX	MG		
A	**	**				****			****		*	*	<i>Porfídica</i>	<i>And. Basáltica</i>
			*			****			****		*	**	<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
			**			****			****		**	**	<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
		****							****	*	**		<i>Microlítica</i>	<i>Basalto</i>
		**				****			****	**	**		<i>Intersertal</i>	<i>Andesita</i>
		**				****			****	**	**		<i>Hialopilitica</i>	<i>Andesita</i>
B			**			****	*		****	**			<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
		***	*			****	*		****				<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
						****			****				<i>Esferulítica</i>	<i>Riolita</i>
C			*			****			****		**	*	<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
	*		*			****			****		*	**	<i>Porfídica</i>	<i>Basalto</i>
			**			****			****		**	*	<i>Intergranular</i>	<i>Andesita</i>
			**			****			****		*	*	<i>Porfídica</i>	<i>Andesita</i>
		*				****			****	*		*	<i>Microlítica</i>	<i>Andesita</i>
			**			****			****		**	*	<i>Pilotaxítica</i>	<i>Andesita</i>
D		*	*			****			****		*		<i>Microlítica</i>	<i>Andesita</i>
			*		*	***		*	****				<i>Piroclástica</i>	<i>Ignimbrita</i>
			*		*	***			****				<i>Piroclástica</i>	<i>Ignimbrita</i>
			*		**	***			****				<i>Piroclástica</i>	<i>Ignimbrita</i>
		*		****				*	****				<i>Piroclástica</i>	<i>Ignimbrita</i>
E		*	****					*	****				<i>Piroclástica</i>	<i>Ignimbrita</i>
	***		**			***			****		**	*	<i>Microlítica</i>	<i>Basalto</i>
			****	**					***				<i>Esferulítica</i>	<i>Riolita</i>

Las abreviaturas empleadas son: OL= olivino; OPX= ortopiroxeno; CPX= clinopiroxeno; FK= feldespato potásico; MG= magnetita; FR= fragmentos de roca; VDR= vidrio; PX= piroxeno; PL= plagioclasa; Q=cuarzo.

Las abundancias modales están normalizadas a -100% independientemente para fenocristales y mesostasis.

Abundancia modal: \*<5%; 5%<\*\*<25%; 25%<\*\*\*<50%;\*\*\*\*>50%.

Capítulo IV.

DESARROLLO

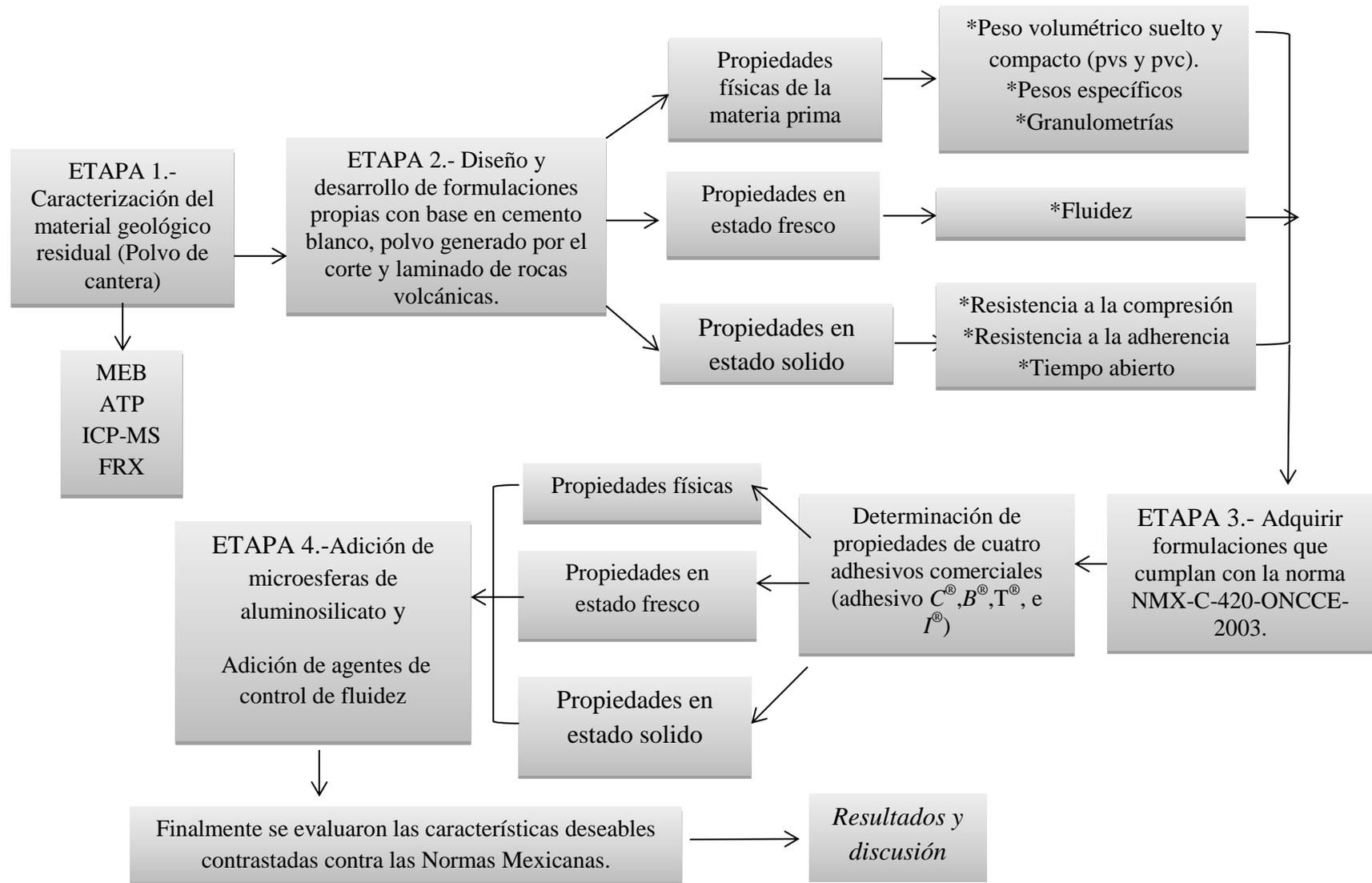
EXPERIMENTAL

## **Capítulo 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

En este apartado se hace una descripción de la metodología que se empleará en la realización del desarrollo experimental de este proyecto de tesis, así como de los equipos y las técnicas de caracterización.

En la *Figura 11* se muestra el diagrama de flujo de la metodología experimental que se aplicó de manera general para la caracterización y análisis de las formulaciones de adhesivos para la industria cerámica utilizando materiales geológicos y residuales.

Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología experimental que se ha seguido de manera general para la caracterización y análisis de las formulaciones.

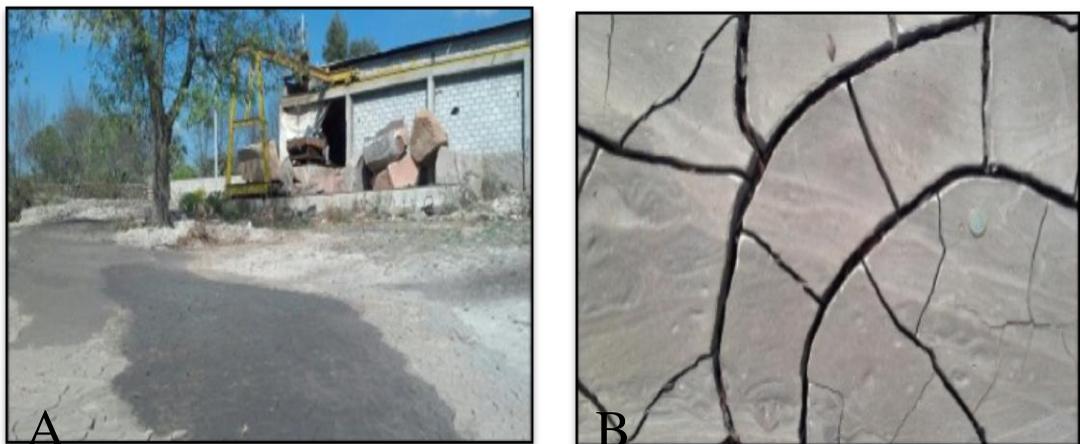


#### 4.1 ETAPA 1. Caracterización del material geológico residual.

En una primera etapa se realizó la caracterización del material geológico, residual propuesto como sustituto del cemento blanco y gris en los adhesivos cerámicos. (Polvo de cantera).

##### 4.1.1.- Muestreo en campo.

Se realizó recolección de muestras en la empresa de corte y laminado de cantera de origen volcánico ubicado en la comunidad de Jonacapa municipio de Huichapan, Hidalgo; a utilizar como sustituyentes de cemento blanco y gris en la fabricación de adhesivos para la industria cerámica.



**Figura 12. A) Esguerramiento de lodo procedente del proceso de corte y laminado de bloques de roca volcánica. B) Detalle de los polígonos de desecación creados en la presa de lodos al deshidratarse el lodo).**

##### 4.1.2.- Laboratorio.

Para preparar mecánicamente las muestras para sus posteriores análisis; se trituraron de forma manual hasta obtener fragmentos con un tamaño promedio de 5 mm; posteriormente se molieron en un pulverizador marca *FRITSCH*, modelo *PULVERISSETTE 2*, que consta con un mortero y pistilo de ágata (con el fin de evitar posible contaminación con metales generados por el desgaste del equipo de molienda); el tiempo de molienda fue de 20 minutos aproximadamente para la obtención del cien

por ciento de la muestra a – 200 mallas. (Véase Figura 13 ) Estableciendo condiciones de liberación de minerales accesorios y paragenéticos.



**Figura 13. Fotografía del pulverizador *FRITSCH PULVERISSETTE 2*.**

Con la finalidad de estudiar el tamaño, la morfología y la estructura cristalina de las partículas tanto de los adhesivos como del mineral usado como sustituto del cemento blanco y gris se hicieron análisis de tamaño de partícula (ATP), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Difracción de Rayos X (DRX) y Plasma de Inducción Acoplado a Espectrometría de Masas (ICP-MS).

En el caso de los análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y análisis de tamaño de partícula (ATP) se realizaron en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales (AACTyM).

Para el análisis de tierras raras y roca total por el método de Espectrometría de Plasma de Masas (ICP-MS) las muestras fueran enviadas y analizadas en los Laboratorios ActLabs en Toronto, Canadá.

Por último las muestras del mineral fueron empaquetadas y enviadas al CINVESTAV unidad Querétaro para la caracterización mineralógica cualitativa por el método de Difracción de Rayos X con el equipo RIGAKU DMax2100.

## 4.2 ETAPA 2. Métodos de análisis para la caracterización mineralógica, química y física del material geológico residual y los adhesivos comerciales.

Para la determinación mineralógica y química tanto del polvo de roca utilizado como sustituto de cemento blanco (material geológico residual) y los adhesivos cerámicos comerciales se utilizó la técnica de Difracción de Rayos X, Microscopia Electrónica de Barrido y Análisis de Tamaño de Partícula (sobre muestra en polvo y compacta) descritas a continuación.

### 4.2.1.- Difracción de rayos X.

La difracción de rayos X consiste en hacer pasar un haz de rayos X a través de las caras de sustancias cristalinas. El haz se hace incidir en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y por difracción da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la ley de *Bragg*.

El Difractómetro de Rayos X empleado es de la marca *INEL EQUINOX 2000* (Véase *Figura 14*), usando la técnica de polvos; las condiciones de medición fueron: radiación con tubo de cobre (35KV y 25 mÅ), velocidad de goniómetro de 2° 2 $\theta$ /min y velocidad de la gráfica de 2 cm/min. La calibración del equipo fue con un estándar de oro proporcionado por el fabricante.



**Figura 14.** Difractómetro de rayos X marca *INEL EQUINOX 2000*.

#### 4.2.2.- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

El objetivo primordial del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) es la magnificación de un cuerpo sólido (MEB o SEM por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscope*). El principio por el cual funciona el MEB es el siguiente: se realiza un barrido de la muestra a analizar con un haz de electrones que al incidir en la muestra genera una imagen acerca de la estructura física de la misma (*Véase Figura 15*).

La interacción entre el haz de electrones y la muestra genera señales secundarias, las cuales son mostradas en un detector apropiado que permite procesar la información para generar una imagen fiel a cierto número de aumentos de la muestra; estas señales son electrones secundarios. Otras señales secundarias son los rayos x, su análisis es a través de un espectrómetro que permite la obtención de información química de la muestra.

La parte superior del MEB contiene un filamento que alcanza temperaturas de 2700° C, emitiendo electrones los cuales son acelerados hacia abajo de la columna por un alto voltaje; la columna enfoca el haz usando lentes electromagnéticas, el haz pasa por unas bobinas deflectoras las cuales permiten que el haz de electrones barra la superficie de la muestra en distintas direcciones y a diferentes velocidades.

El haz de electrones interacciona con regiones cerca de la superficie de la muestra, con una profundidad aproximada de unas cuantas micras formando un volumen de interacción y generando distintas señales.



**Figura 15. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JMS-6300.**

*Preparación de la muestra para Microscopía Electrónica de Barrido:*

Para el análisis de las muestras seleccionadas por microscopía electrónica de barrido (MEB) se empleó un microscopio de marca *JEOL* modelo *JMS-6300*, el cual tiene una resolución de 20 KV teniendo un alcance de 300,000 ampliificaciones y tamaño de incidencia del haz de electrones en la muestra (*spot size*) de  $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  amperios.

El objetivo del análisis fue observar la morfología y estructura de las muestras tanto de los adhesivos como de la roca sustituto (en polvo y después del fraguado); se montó las muestras previamente molida a 200 mallas (en el caso de la roca sustituto) sobre una cinta adhesiva.

*Análisis de la muestra por MEB:*

Se montó una muestra sobre el portamuestras del equipo, procurando que éste perfectamente alineada, una vez que la columna de electrones del microscopio tiene el vacío adecuado (inferior a  $10^{-7}$  Torr) se hace incidir un haz de electrones al espécimen a 15 KV. Se realiza un barrido de todo el espécimen para identificar las fases de interés, observar los detalles texturales y contornos a diferentes ampliificaciones.

*Análisis de imagen.*

Después se obtiene una imagen enfocada con buen contraste brillantez que muestre los rasgos texturales y diferentes tonos de grises de las diversas fases elementales minerales que constituyen la microárea analizada.

*Fotomicrografías.*

Por último se toman fotomicrografías tanto de la imagen de electrones secundarios como de los mapeos electrónicos de las fases de interés.

#### 4.2.3.- Análisis de Tamaño de Partícula (ATP).

El tamaño de la partícula es una de las características más importantes de un polvo cerámico, debido a la influencia que se genera en la interacción entre las partículas al reducirse el tamaño, de tal manera que las partículas mantienen una configuración estable generando una estructura porosa.

Dada la importancia actual en la obtención de polvos cerámicos con características predeterminadas, aparece el interés científico e industrial de determinar de manera confiable tamaño, distribución y morfología de las partículas. Los métodos ópticos son un importante medio para obtener dicha información. En este trabajo se presenta un análisis cuyo sistema de medida se basa en la difracción que experimenta el haz láser al interactuar con las partículas sólidas.

Para este estudio se utilizó un analizador de tamaño *Beckman Coulter LS 13320* (Véase Figura 16), el cual mide la distribución de tamaños de partículas suspendidas en líquido o en forma de polvo seco, de acuerdo al principio de dispersión de luz. Este analizador proporciona resultados confiables y reproducibles para los investigadores, laboratorios de control de calidad, departamentos de productos de control de proceso o para todo aquello en lo que se necesite medir tamaños de distribución de partículas.

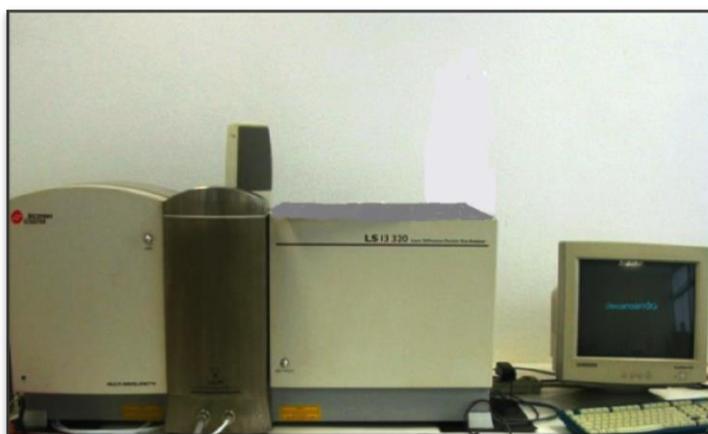


Figura 16. Analizador de tamaño de partículas *Beckman Coulter LS 13320*.

#### 4.2.4.- Plasma acoplado por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-MS).

La técnica de espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) cuantifica la mayoría de los elementos en la tabla periódica con alta sensibilidad de detección y una precisión de muchos órdenes de magnitud, determinando concentraciones en ppm, ppb y ppt de los elementos de interés; esta técnica se ha convertido en la mejor herramienta analítica para la determinación de elementos traza. Los elementos son medidos simultáneamente y puede realizarse un análisis completo en un promedio de dos minutos.

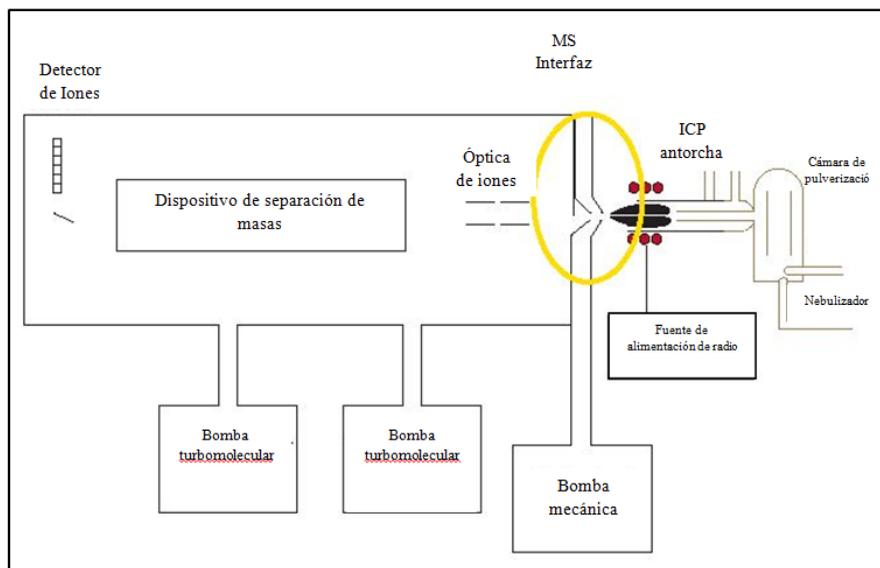
La técnica de plasma (flama) presenta una alta temperatura y que está en el rango de 6000 a 10000° K, la muestra en solución se introduce en forma de aerosol a través de un nebulizador hacia el plasma de argón.

El plasma de inducción acoplado es una corriente de átomos de argón sometidos a un aumento de temperatura debido a la inducción de una bobina de radiofrecuencia y encendida por una chispa de alta frecuencia (*Tesla*). La muestra se disocia en el plasma de argón y se excita un gran número de átomos que emiten energía en diferentes longitudes de onda a un mismo tiempo, la energía así emitida es detectada por fotomultiplicadores que incrementan las lecturas tanto de estándares de calibración certificados y muestras; las intensidades obtenidas de las muestras se convierten a sus respectivas concentraciones.



Figura 17. Técnica de ICP-MS.

En espectrometría de masas (MS) se generan iones cargados del elemento que se analiza tanto por bombardeo de una muestra gaseosa con electrones (fuente gaseosa) o por la volatilización de la muestra sobre un filamento incandescente hecho de algún metal de punto de fusión alto (fuente sólida). El haz de iones circula a lo largo de un tubo curvado a través de un electroimán muy poderoso que separa los iones atómicos de acuerdo a su masa.



**Figura 18. Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).**

La espectroscopia ICP-MS es una herramienta multielemental para análisis isotópicos y de elementos traza con alta sensibilidad, capaz de determinar concentraciones muy bajas de los analitos con alta precisión. Puede usarse para analizar un amplio rango de elementos traza, en la misma solución, usando una muestra pequeña. Los iones se extraen del plasma a través de un sistema de vacío y enfocados con un lente iónico hacia un espectrómetro de masa.

El ICP-MS utilizado es de la marca *Perkin-Elmer*, modelo *ELAN 6100*, con capacidad de monitorear rango de masas desde 5 - 250 uma con una capacidad mínima de resolución de 1 uma; anchura de pico del 5 % de la altura del pico. (ELAN 6100).

Se realizó un estudio de caracterización de cuatro adhesivos comerciales (adhesivo *Crest*<sup>®</sup>, *Bexel*<sup>®</sup>, *Termolita*<sup>®</sup>, e *Interceramic*<sup>®</sup>). Esta caracterización contempló la determinación de propiedades físicas de la materia prima (Peso Volumétrico Suelto y Compacto, (NMX-C-073, ASTM - C29/C29M-09,) Peso Específico (NMX C 165, ASTM - C128 - 12) y Granulometría (NMX-C-077, ASTM-C117-13 ASTM C136-81),) así como Propiedades en el Estado Fresco (Determinación de la Fluidez) (NMX-C-144-NMX-C-122, ASTM - C230/C230M - 14, ASTM C1437 - 13) y Propiedades en Estado Sólido (Resistencia a la Compresión y Pesos Específicos (ASTM- C 109/C 109M - 02, NMX-C-420) y Resistencia a la Adherencia (ASTM - C321 - 00, NMX-C-420), siguiendo paso a paso la norma de calidad.

#### **4.2.5.- Propiedades físicas del material geológico residual.**

##### **4.2.5.1 Pesos Volumétricos**

La determinación de pesos volumétricos sueltos y compactos se realizó de acuerdo a Norma NMX-C-073-2004, (ASTM C29-91) esta norma mexicana establece el método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados finos y gruesos o de una combinación de ambos. Este método es aplicable a agregados cuyo tamaño máximo nominal no excedan de 150 mm.

Esta norma se complementa con las siguientes normas mexicanas vigentes:

NMX-C-030-0NNCCE, Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo

Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, al tamaño requerido para las pruebas.

NMX-C-111-0NNCCE, Industria de la Construcción - Concreto - Agregados - Especificaciones.

NMX-C-166, Industria de la Construcción - Agregados - Contenido total de humedad por secado - Método de prueba.

NMX-B-231, Industria Siderúrgica - Cribas para la clasificación de materiales granulares - Especificaciones.

*Para los efectos de esta norma se establecen las siguientes definiciones:*

*Masa seca.*

El agregado es considerado seco cuando se ha mantenido a una temperatura de  $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$  ( $110^\circ\text{ C} \pm 5^\circ\text{ C}$ ) durante el tiempo necesario para lograr masa constante. El material se considera seco cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas es igual o menor que 0,1 % de la masa de material.

*Masa volumétrica.*

Es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado.

*Los equipos, aparatos e instrumentos que se usaron en esta caracterización fueron:*

✓ Balanza.

Dispositivo sensible para determinar la masa de la muestra con una precisión igual o mayor a 0,1 % de la masa por utilizar.

✓ Horno o fuente indirecta de calor.

Horno con termostato ajustable para mantener la temperatura en  $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$  ( $110^\circ\text{ C} \pm 5^\circ\text{ C}$ ), o plancha eléctrica o de gas que permita el secado del material sin calcinarlo.

✓ Placa de vidrio.

Debe ser cuadrada, de 6 mm de espesor y de cuando menos 25 mm mayor con respecto al diámetro del recipiente que se vaya a emplear.

## ✓ Varilla.

Debe ser de acero, de sección circular de  $16 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$ , recta y lisa de  $600 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$  de longitud cuando menos con uno de los extremos semiesféricos, del mismo diámetro.

## ✓ Recipiente.

Debe emplearse un recipiente cilíndrico de metal inoxidable, estanco y suficientemente rígido, para conservar su forma y volumen calibrado bajo uso rudo. Debe ser maquinado de forma tal, que conserve medidas precisas en su parte interior y de preferencia provisto de dos manijas. El borde superior del recipiente debe ser plano, con una tolerancia de  $0.25 \text{ mm}$ ; se considera plano al no poder insertar un calibrador de  $0.25 \text{ mm}$  entre el borde y una placa de vidrio de por lo menos  $6 \text{ mm}$  de espesor, colocada encima de dicho borde. Su capacidad y especificaciones deben estar de acuerdo con la *Tabla 2*. La capacidad calibrada del recipiente puede tener una tolerancia de:  $\pm 10 \%$  respecto a la capacidad indicada en la *Tabla 2*.

La relación entre el diámetro y la altura interior debe estar dentro de 0.8 y 1.2.

**Tabla 2. Dimensiones de los recipientes.**

Capacidad $\text{dm}^3$ (L)	Espesor mínimo (mm)		Tamaño máximo nominal del agregado (mm)
	Fondo	Pared	
5	5	2.5	13
10	5	2.5	25
14	5	3	40
28	5	3	100

Los recipientes de  $14 \text{ dm}^3$  y  $28 \text{ dm}^3$  deben estar reforzados en el borde superior con una cinta de acero no menor de  $5 \text{ mm}$  de grueso y  $38 \text{ mm}$  de ancho.

## ✓ Enrasador (Regla metálica).

Debe ser una placa rectangular, lisa y rígida, de  $3 \text{ mm}$  de espesor mínimo,  $50 \text{ mm}$  de ancho mínimo y una longitud mínima de  $100 \text{ mm}$ , mayor al diámetro del recipiente que se va a emplear.

- ✓ Equipo de uso general.

Pala cuadrada, cucharón metálico de un litro de capacidad mínima.

*Preparación y acondicionamiento de la muestra.*

Se toma una muestra de agregado de acuerdo con el método de muestreo descrito en la NMX-C-030-0NNCCE, y se reduce a un volumen de aproximadamente 1.5 veces la capacidad del recipiente que se va a emplear, de acuerdo con la NMX-C-170 ONNCCE.

*Condiciones ambientales.*

El sitio donde se efectúen las pruebas no debe estar expuesto al sol ni a corrientes de aire.

Durante la ejecución de las pruebas, las condiciones ambientales del lugar deben ser estables.

*Procedimiento.*

*Calibración del recipiente.*

Se colocó el recipiente con la placa de vidrio en la báscula y se determinó su masa en kilogramos (kg), con la aproximación que da la precisión de la misma. Se engrasó el borde del recipiente para evitar escurrimiento de agua.

Se llenó el recipiente con agua limpia a la temperatura ambiente y cubrir con la placa de vidrio engrasando el borde del recipiente, de afuera hacia adentro, de tal modo que se elimine el exceso de agua y se seca el exterior del recipiente, si aparecen burbujas de aire, debe repetirse el procedimiento.

Se determinó la masa neta del agua con la aproximación que da la precisión de la báscula.

Se mide la temperatura del agua y en función de ella, se obtiene la masa unitaria del agua en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$F = \frac{MU}{MA}$$

Dónde:

F es el factor en un metro cúbico ( $1\text{m}^3$ )

MU es la masa unitaria del agua que se obtiene de la tabla 2, en  $\text{kg/m}^3$

MA es la masa del agua requerida para llenar el recipiente, en kg.

En la pared exterior del recipiente se anotó con tinta indeleble, el factor y la masa del mismo.

El recipiente debe ser calibrado por lo menos una vez al año o cuando se dude de su exactitud.

**Tabla 3. Masa unitaria del agua a varias temperaturas.**

K	°C	MU ( $\text{kg/m}^3$ )
273-285	0-12	1000.0
288	15	999.1
291	18	998.6
294	21	998.0
296	23	997.5
297	24	997.3
300	27	996.5
302	29	996.0
303	30	995.8

#### 4.2.5.2 Determinación de la masa volumétrica compactada (Pesos volumétricos compactos).

*Procedimiento de compactación con varilla.*

El recipiente se llena hasta la tercera parte de su volumen y la superficie se nivela con los dedos. El material se compacta con la varilla, dándole 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la superficie y con una fuerza tal que no triture las partículas del agregado. A continuación se agregó material hasta las dos terceras partes de su volumen y nuevamente se compacto con 25 penetraciones de acuerdo como se describió anteriormente. El recipiente se llenó totalmente hasta que el material sobrepase el borde

superior y se vuelve a compactar con 25 penetraciones. Mediante este procedimiento, las partículas del agregado se acomodan por sí mismas hasta alcanzar una condición compacta.

Se determinó la masa total del recipiente con el material.

Se calculó la masa neta del material contenida en el recipiente.

La masa volumétrica del agregado, se obtiene multiplicando la masa neta del agregado en kg, por el factor.

#### 4.2.5.3 **Determinación de la masa volumétrica suelta (PVS).**

El recipiente se llenó hasta que el material sobrepase el borde sin derramarse, por medio de una pala o cucharón dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente distribuyéndolo uniformemente, para evitar la segregación.

El enrase se hace con el enrasador, mediante una operación de corte horizontal.

La masa volumétrica obtenida en  $\text{kg/m}^3$  determinada por estos métodos de prueba, es para agregados secos.

#### 4.2.5.4 **Pesos Específicos (Uso de Picnómetro)**

Peso específico es la relación dada entre el peso y el volumen de un material sólido o líquido.

Se colocó el polvo del adhesivo en el picnómetro y se compacta hasta llenar a ras, luego se pesa dando el peso de la muestra de polvo. A continuación, se completó el llenado del picnómetro con agua desionizada o destilada. El peso del líquido desplazado es registrado y así se halla la gravedad específica del sólido.

Todas las determinaciones para que sean válidas deben ser a la misma temperatura.

Teniendo en cuenta que el volumen es siempre el mismo:

$$V_{\text{agua}} = V_{\text{muestra}}$$

y que a partir de la definición de densidad;

$$\rho = \frac{m}{V}$$

se dice que, con el mismo volumen, la densidad es proporcional a la masa.

La densidad de la muestra viene dada por:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{m_2} \rho_2$$

Siendo:

$m_1$ : Masa de muestra contenido en el picnómetro;

$\rho_1$ : Densidad de la muestra contenido en el picnómetro;

$m_2$ : Masa de agua (o líquido de densidad conocida) contenido en el picnómetro;

$\rho_2$ : densidad del agua (o líquido de densidad conocida) contenido en el picnómetro.

Unidades.

Los resultados se expresan usualmente como  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{g/cm}^3$ .

#### 4.2.5.5 Granulometría.

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra.

Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría).



**Figura 19. Tamices.**

Este método de ensayo es usado para determinar la graduación de materiales propuestos para usarse como agregados o que están siendo usados como agregados. Los resultados son utilizados para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas con los requerimientos aplicables especificados y para proporcionar información necesaria para el control de la producción de productos varios de agregados y de las mezclas que los contienen. La información también puede ser usada en el desarrollo de relaciones concernientes a la porosidad y el empaque. (ASTM C 136 – 01.)

El ensayo trata básicamente de separar una muestra de agregado seco de masa conocida, a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, con el objeto de determinar los tamaños de las partículas.

Si el material para el ensayo no proviene de un ensayo estándar para material más fino que la malla n° 200 (75  $\mu\text{m}$ ) en agregado mineral por lavado. (ASTM C 117 – 95.), el tamaño de la muestra de prueba está dada en función del tamaño máximo de las partículas de material a analizar según la *Tabla 4*.

**Tabla 4. Selección del tamaño de la muestra de prueba.**

Tamaño máximo nominal (mm.)	Tamaño mínimo de la muestra de prueba (kg)
9.5	1
12.5	2
19	5
25	10
37.5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

La determinación de la exactitud del material más fino que la malla de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) no puede ser obtenida sólo por el uso de este método.

La determinación de la granulometría se realizó de acuerdo a Norma NMX-C-077-1997, (*ASTM-C117-13 ASTM C136-81*) en esta Norma Mexicana se establece el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas.

Esta Norma se complementa con las siguientes Normas Mexicanas en vigor:

NMX-B231 Cribas para la clasificación de materiales granulares.

NMX-C030 Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo.

NMX-C-084 Industria de la construcción - Agregados concreto, partículas más finas que la criba no. 0.075 mm (200) por medio de lavado - Método de prueba.

NMX-170 Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de la muestra de agregados, obtenidas en el campo al tamaño requerido para la prueba.

*Aparatos y equipos.*

- ✓ Charolas.
- ✓ Cucharón.
- ✓ Balanza con una aproximación de 0.1% de la masa de la muestra.
- ✓ Horno ventilado y que sea capaz de mantener una temperatura de  $383\pm 5K$  ( $110\pm 5^\circ$ ).
- ✓ Juego de cribas que cumplan con las especificaciones de la NMX-B-231.
- ✓ Máquina agitadora para el cribado que sea capaz de sostener el juego completo de cribas para determinación. Puede ser accionada por motor o manivela.

*Preparación de la muestra.*

La muestra del agregado que se va a emplear para el análisis granulométrico se toma de acuerdo a la NMX-C-30 y se redujo de acuerdo con lo indicado en la NMX-C-170. El agregado fino se debe humedecerse antes de iniciar la reducción del tamaño de la muestra para evitar la segregación.

Debe preverse que la muestra seca tenga la masa apropiada para efectuar la prueba de acuerdo con lo indicado.

La muestra por analizarse debe ser el resultado final de la reducción por cuarteo y no debe permitirse el ajuste a una masa predeterminada.

*Agregado fino.*

La muestra para la prueba de agregado fino se secó teniendo una masa aproximada de las cantidades siguientes:

- Agregados que tienen por lo menos 95% que pasa la criba No. 8 (2.36) a 100 g.

- Agregados que tienen por lo menos 85% que pasa la criba No.4 (4.75) y se retiene más del 5% en la criba No. 8 (2.36 ) a 500 g.
- Debe tenerse especial cuidado al seleccionar el tamaño de la muestra a fin de evitar que al terminar el cribado, se tenga en cualquiera de las cribas un retenido cuya masa sea mayor de  $0.6\text{g/cm}^2$  de superficie del cribado; este valor equivale a 180 g para las cribas de 203 mm de diámetro (en el marco).

*Procedimiento.*

Se seco la muestra hasta obtener una masa constante a una temperatura de  $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$  ( $110^\circ\text{ C} \pm 5^\circ\text{ C}$ ).

Se armaron las cribas en orden descendente de aberturas, terminando con la charola (fondo) (Véase Figura 19) y se colocó la muestra en la criba superior y se tapa bien. Se agitan las cribas a mano o con un aparato mecánico por un tiempo suficiente.

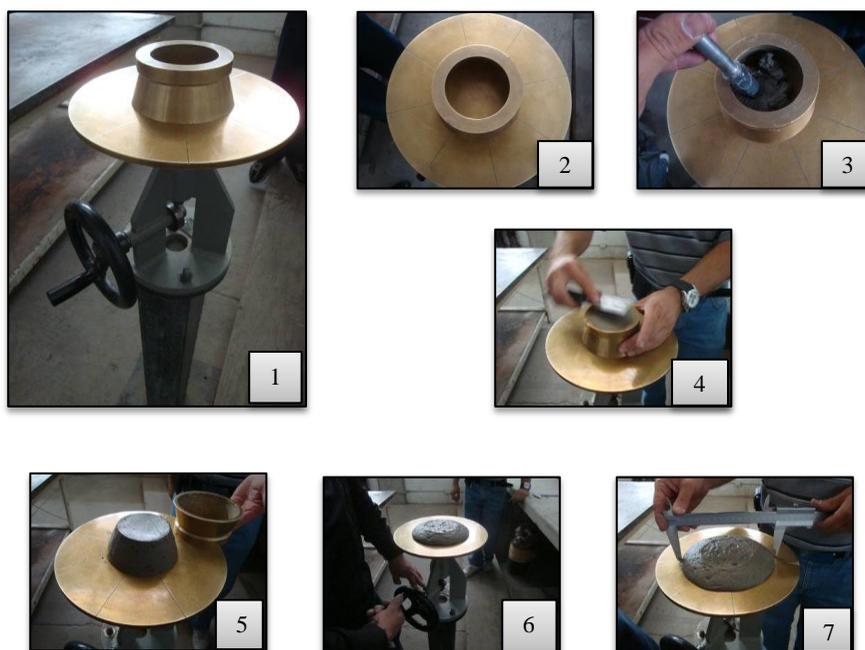
Se continúa el cribado por un periodo suficiente de tal manera que después de haberse completado, no más de 1% en masa de residuo, en cualquier criba individual.

Se mantiene la criba individual con su charola y tapa bien ajustadas en posición ligeramente inclinada en una mano. Se golpea el lado de la criba con rapidez, se le da un movimiento hacia arriba y golpea con la palma de la mano de la otra mano a una frecuencia de 120 veces por minuto, se gira la criba un sexto de vuelta cada vez que se le dan 25 golpes. Para determinar la eficiencia del cribado de tamaños mayores de la criba No.4 (4.75) se limita el material sobre la criba de tal forma que solo haya una capa de partículas.

Se determina la masa retenida en cada criba por medio de una balanza y se calculan los porcentajes hasta los décimos.

*Cálculos*

Se calculan los porcentajes basados en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la criba No. 0,075.

**4.2.6.- Propiedades en el estado fresco.****4.2.6.1 Determinación de la fluidez.**

**Figura 20. Proceso de determinación de la fluidez del mortero. De izquierda a derecha: 1. Equipo de prueba, 2. Vista de planta del molde y plataforma de bronce, 3. Llenado del molde, 4. Retiro de exceso de material, 5. Retiro del molde, 6. Golpeteo de la plataforma y 7. Medición de la extensión del mortero.**

La determinación se realiza de acuerdo a la Norma NMX –C-144-ONNCCE 2010, y en la cual se emplea una mesa, que consta en esencia de: un soporte, un árbol y una plataforma circular. La plataforma circular tiene un diámetro medio de  $254 \pm 2.54$  mm ( $10 \pm 0.1$ " ) y es bronce o latón de dureza Rockwell no menor de 25 B. La cara superior es plana, pulida y libre de defectos superficiales. El equipo se complementa con un cono truncado de aproximadamente 100 mm de diámetro inferior interno, 70 mm del diámetro superior interno y una altura de 50 mm. (Véase Figura 20).

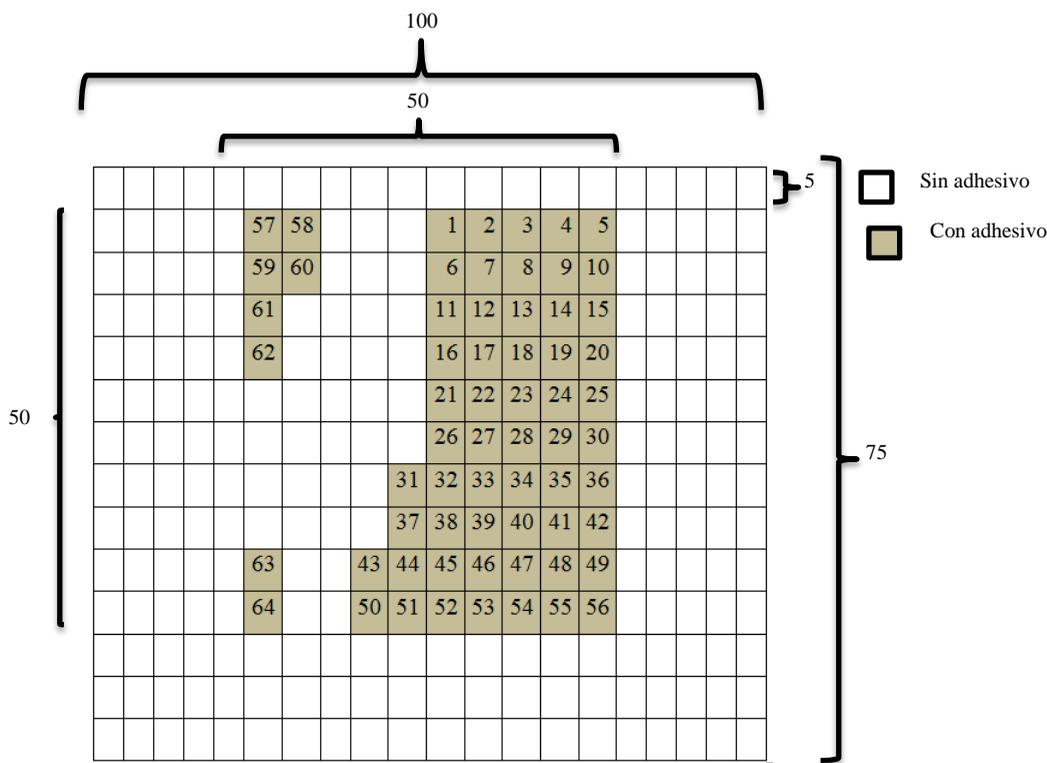


Figura 21. Cuadrícula de material acrílico

#### 4.2.6.2 Tiempo Abierto.

Es el intervalo máximo de tiempo que transcurre después de que el adhesivo se ha extendido en el sustrato, durante el cual las piezas pueden ser colocadas y quedar adheridas, esto antes de la formación de una película superficial que evite la humectación y adherencia de la pieza.

#### Materiales auxiliares.

- ✓ Adhesivo preparado, 1 kg
- ✓ Pesa de sección cuadrada de 5 cm x 5 cm y 2 kg
- ✓ Placa de concreto según lo descrito anteriormente.
- ✓ Cuadrícula de material acrílico, según Fig. 21)
- ✓ Piezas cerámicas de 50 mm x 50mm de alta absorción (Absorción de agua entre 13% y 15% según lo descrito en la referencia..)

*Equipos, aparatos e instrumentos.*

- ✓ Cronómetro que aprecie segundos.
  
- ✓ Llana dentada con dientes de 6 mm x 6 mm y espacios de 6 mm.

*Procedimiento.*

Se emplea mezclas adhesivas según lo descrito en la *Tabla 7*.

Se extiende la mezcla adhesiva sobre el sustrato con el lado liso de la llana y se peina con la llana del lado dentado con una inclinación aproximada de  $60^\circ$  llegando al ras del sustrato; quedando hilos en una sola en una sola dirección de aproximadamente 5mm y se acciona de inmediato el reloj.

Inmediatamente se coloca una pieza cerámica (dejando 50 mm libres entre sus lados como mínimo).

En forma inmediata se coloca suavemente una pesa de 2 kg, esta se retira de 30 s.

Se levanta la pieza y se determina la cantidad porcentual de la mezcla adhesiva remanente en ellos, empleando la cuadrícula indicada en la *Figura 21*.

A los 5 minutos de haber pegado la primera pieza, se coloca otra pieza sobre una porción de mezcla no utilizada, dejando 50 mm libres entre sus lados como mínimo y se coloca la pieza.

Se repite el proceso cada 5 min hasta que el valor de C promedio sea menor del 50%. Es conveniente continuar por un lapso de 2 minutos más para detectar posibles resultados anormales.

*Cálculo y expresión de los resultados.*

Se calcula el porcentaje de mezcla adhesiva mediante la siguiente fórmula:

$$C = \frac{n}{100} \times 100 = n$$

Dónde :

C es la cantidad porcentual de la mezcla adhesiva (%).

n es el número de cuadros de 5 mm x 5mm que permanecen el mortero en cada una de las probetas; se considera “como mezcla adhesiva” a todo cuadro que tenga cubierto no menos del 50 % del área.

100 es el factor para expresar los resultados en porciento;

100 es el número total de cuadros a contarse en cada probeta.

Se considera como “ *tiempo abierto* ” el último tiempo en el cual el calor de C sea mayor o igual a 50 %.

Es muy recomendable efectuar una gráfica de C en función del tiempo, a manera de poder poner en evidencia eventuales valores anormales.

Los adhesivos según su tipo deben cumplir con lo establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**Tabla 5. Tiempos Abiertos.**

Tipo de adhesivo	Tiempo en minutos	Porciento mínimo de superficie cubierta
A	10	50
B	10	50
C	10	50

*Tiempo de vida en recipiente.*

Es el tiempo en el aplicador tiene una vez que se ha preparado la mezcla adhesiva en el recipiente, para poder extender la mezcla conservando sus propiedades físicas y mecánicas.

*Transferencia de adhesivo.*

Es el área aparente de adhesivo expresado en puntos porcentuales (%), que se queda unido a la cerámica después de aplicar un peso de 0.2 N durante 30 s.

*Vida de anaquel.*

Es el tiempo en el que el producto en su envase original puede ser almacenado bajo las condiciones recomendadas por el fabricante conservando sus propiedades para poder usarlo

*Clasificación y designación del producto.*

Los adhesivos de acuerdo a la norma norma NMX-C-420-ONCCE-2003 se clasifican de acuerdo a sus propiedades de aplicación en tres tipos de acuerdo a lo especificado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cada uno de ellos es recomendado para la colocación de recubrimientos cerámicos específicos.

**Tabla 6. Clasificación de piezas cerámicas.**

Tipo de adhesivo	Piezas cerámicas	Absorción agua en peso (%)
A	Muro	$> 18 \leq 20 \%$
	Cottoforte	$> 7 \leq 18 \%$
	Semigresificada	$> 3 \leq 7 \%$
B	Gresificada	$> 0.5 \leq 3 \%$
C	Porcelánica	$\leq 0.5 \%$

Para seleccionar el tipo de adhesivo a emplear en la colocación de piedras naturales debe consultarse con el fabricante de adhesivo tomando en cuenta el porcentaje propio de absorción de agua del recubrimiento, según lo descrito en la *Tabla 6*.

**Tabla 7. Recomendaciones básicas de uso.**

<b>Tipos de adhesivo</b>	<b>Uso recomendado</b>	<b>Tipo de cerámico</b>
<b>A</b>	En muros interiores	Muro, Cottoforte.
<b>B</b>	En muros interiores y exteriores	Muro, Cottoforte, Semigresificada y Gresificada.
<b>B</b>	En pisos interiores y exteriores	Muro, Cottoforte, Semigresificada y Gresificada
<b>C</b>	En muros interiores y exteriores, en pisos interiores y exteriores	Muro, Cottoforte, Semigresificada, Gresificada y porcelánica

Las mezclas adhesivas cementicias no se recomiendan para la instalación de “mármol verde” dado que estas piedras naturales pueden presentar cambios dimensionales al estar en contacto con el agua.

#### **4.2.7.- Propiedades en estado sólido**

Estas propiedades fueron determinadas siguiendo paso a paso la NMX-420-ONCCE-2003.

Esta norma mexicana establece las especificaciones y métodos de prueba para las mezclas adhesivas formuladas a partir de cementos hidráulicos de importación o fabricación nacional para su uso o comercialización en la República Mexicana, cuyo destino es la fijación o colocación de recubrimientos cerámicos y de piedras naturales.

Para la correcta aplicación de esta norma, se deben consultar las siguientes normas mexicanas vigentes:

NOM-002-SCFI Productos pre-ensados - Contenido neto, tolerancia y métodos de verificación.

NOM-030-SCFI Información comercial - Declaración de cantidad en la etiqueta

NMX-C-414-ONNCCE Insistía de la construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba.

*Definiciones.*

Para los efectos de esta norma mexicana se establecen las siguientes definiciones.

**a** Adherencia.

Propiedad de la mezcla de resistir tensiones normales o tangenciales que actúan en el recubrimiento y en el sustrato. (fuerza máxima por unidad de superficie).

**b** Adhesivo.

El adhesivo para cerámica es un mortero, es decir, mezcla de cemento, cargas minerales y aditivos químicos en polvo o líquido.

**c** Absorción de agua.

Es la cantidad de agua que puede aceptar y retener una pieza cerámica o piedra natural al estar sumergida en agua de acuerdo al procedimiento descrito en el apéndice A.1

**d** Ajustabilidad.

Es el tiempo que el instalador tiene una vez que la pieza ha sido colocada para corregir su posición sin que esta se desprenda.

**e** Apisonar.

Golpear o compactar el mortero con un pisón de madera tratada o de hule comprimido.

**f** Cemento hidráulico.

Es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua o mezclado con arena, grava u otro material similar tiene

la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilida

**g** Enrasar.

Nivelar la superficie de un material contenido en un recipiente al borde de dicho recipiente.

**h** Factor de agua.

Es la cantidad de agua recomendada por el fabricante para poder realizar el mezclado del adhesivo.

**i** Fraguado.

La condición alcanzada por una pasta de cemento, mortero o concreto cuando pierde plasticidad en un grado arbitrario, usualmente medida en términos de resistencia a la penetración o deformación; el fraguado inicial es referido al principiar la rigidez; el fraguado final es referido a la obtención de una rigidez significativa.

**j** Loseta o pieza cerámica.

Placa fabricada con materiales inorgánicos, las cuales son prensadas y quemadas, generalmente son utilizadas como revestimientos para pisos y muros en interiores y exteriores, ortogonales un acabado decorativo resistente y durable. Las losetas cerámica pueden ser esmaltadas o no esmaltadas.

**k** Pisón.

Cuerpo de madera o hule comprimido de sección transversal 12.54 mm x 25.4 mm x 152.5 mm no absorbente al agua.

**l** Piedras naturales.

Piezas que se extraen de yacimientos naturales y que por medio de diferentes procedimientos de corte y acabado se les da forma, tamaño y dimensiones adecuadas para poder colocarse sobre muros y pisos, generalmente como recubrimientos. Ejemplos de piedras naturales son: Mármol, cantera, lajas, rocas volcánicas, entre otras.

**m** Sustrato.

Es la superficie sobre la cual es aplicada la mezcla adhesiva. Se considera estructuralmente firme si es dimensionalmente estable, resistente, compacta y dura permanentemente.

**n** Placa de concreto para realización de pruebas.

Las condiciones ambientales para la realización de esta prueba deben ser de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $50\% \pm$  de humedad relativa y una circulación de aire en el área de trabajo de menos de 0.2 m/s.

La placa de concreto debe tener un espesor no menor de 40 mm. La absorción de agua en la superficie de la placa después de 4 h, debe ser menor o igual  $1.5\text{ cm}^3$ . La resistencia a la tensión no debe ser menor de  $1,5\text{ N/mm}^2$ . La superficie debe tener un acabado similar al obtenido con una placa de madera y al momento de la prueba debe estar limpia y exenta de polvo.

*Equipos, aparatos e instrumentos.*

- ✓ Placa metálica cuadrada de  $50\text{ mm} \pm 1\text{ mm} \times 50\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$  y un grosor mínimo de 10 mm con un dispositivo de acoplamiento adaptado a la máquina de tracción.
- ✓ Máquina de ensayos que permita ejercer una fuerza de tracción directa a una velocidad de 250 N/s, mediante el dispositivo de acoplamiento sin causar deformación. (compresora Modelo: E666-6, Serie No. 101119, Capacidad: 150000kg, Esp. Eléctricas 110V).
- ✓ Adhesivo en polvo o según su presentación en venta, la cantidad empleada es según la prueba a realizar (*Tabla 4*).
- ✓ Agua o líquido necesario especificado por el fabricante.

- ✓ Máquina impulsada eléctricamente del tipo epicíclico que imparte un movimiento orbital y de rotación a una paleta colocada en posición vertical dentro de una olla.

Debe contar por lo menos con dos velocidades distintas que se pueden cambiar por medios mecánicos) (no se deben ajustar las velocidades por medio de reóstatos).

La velocidad baja debe girar la paleta a  $140 \text{ r/min} \pm 5 \text{ r/min}$  con un desplazamiento orbital de 62 vueltas por minuto, aproximadamente. A la velocidad alta la paleta debe girar a  $285 \text{ r/min} \pm 10 \text{ r/min}$  con un desplazamiento orbital de 125 vueltas por minuto aproximadamente. El motor eléctrico debe tener una capacidad no menor de 124 W (1/6 HP).

La mezcladora debe estar dotada de un soporte que permita ajustar la posición de la paleta dentro de la olla de tal manera que se conserve una holgura predeterminada entre la arista inferior de la paleta y el fondo de la olla.

Esta holgura no debe ser mayor de 2.5 mm ni menor de 0.8 mm cuando la olla este en posición de mezcladora, para la cual la mezcladora debe contar con un dispositivo de ajuste.

- ✓ Paleta

Debe de ser de acero inoxidable y fácilmente desmontable del eje motriz de la mezcladora, estar construida como se indica en la *Figura 22* y ser de tales dimensiones, que cuando este en posición de mezclado el perfil de dicha paleta siga el perfil de la olla usada para la mezcla y la holgura existente entre la arista de la paleta y la superficie interior de la olla en su posición más cercana debe ser aproximadamente 4mm pero no menor a 0.8 mm.

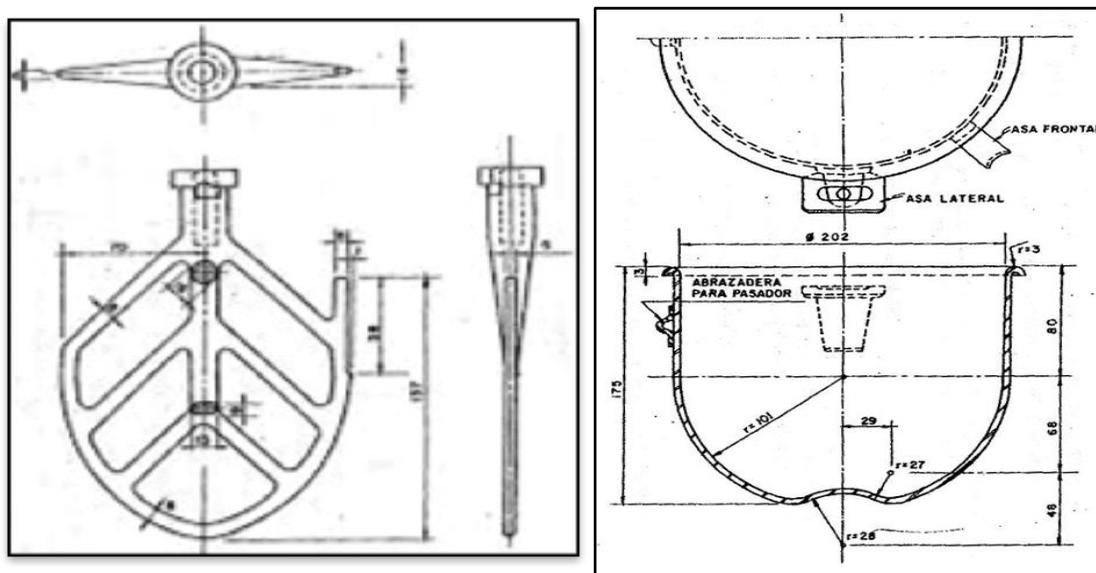


Figura 22. Paleta para mezcladora.

✓ Olla de mezclado.

Debe ser desmontable de la mezcladora y tener una capacidad nominal de 4.73 L, fabricada con acero inoxidable y de acuerdo a las dimensiones, perfiles y tolerancias.

Debe tener unos dispositivos para ajustarse firmemente a la mezcladora y dotarse de una tapa de material absorbente y no atacable por los cementos.

✓ Espátula.

Debe de ser de hule semiduro provisto de un mango de aproximadamente 200 mm de longitud. La espátula en si debe tener unos 100 mm de largo por 50 de ancho, la parte que se usa para bajar el material, debe adelgazarse en el eje longitudinal hasta tener una arista de aproximadamente 2,0 mm de espesor.

*Procedimiento.*

Las cantidades de adhesivo cementítico seco necesario para la realización de cada uno de los métodos a evaluar especificados en esta norma se definen en la *Tabla 7*.

**Tabla 8. Cantidades de mezcla adhesiva seca.**

Método de prueba	Cantidad en Kg
Tiempo abierto	1
Resistencia a la tensión en función al tiempo	2
Deslizamiento	1
Resistencia a la compresión	2
Resistencia a la tensión (inmersión en el agua y choque térmico)	2
Total	8

La cantidad de agua o líquido a mezclar necesaria para la preparación de adhesivo debe de ser la especificada por el fabricante en partes en peso (Es decir el líquido por polvo seco). En caso de que se especifique un intervalo de valores, debe tomarse el valor medio.

Se Mezcla la cantidad necesaria de adhesivo en polvo para la realizaciones las pruebas según lo descrito en la *Tabla 7* en una amasadora del tipo descrito anteriormente usando la velocidad baja establecida  $140 \text{ r/min} \pm 5 \text{ r/min}$  de movimiento planetario.

Se pone el líquido en el recipiente de la amasadora;

Se dispersa lentamente el polvo seco por el líquido.

Se mezcla por 30 s a velocidad baja;

Se retira la paleta del mezclado;

Se retira de la paleta de mezclado y de la parte alta del recipiente el material que quedo adherido para regresarlo al recipiente; y se mezcló por un minuto más..

#### ***4.2.7.1 Resistencia a la compresión***

Los adhesivos según su tipo, deben tener como mínimo una resistencia a la compresión a 28 días, según lo establecido en la *Tabla 9*.

**Tabla 9. Resistencia a la compresión.**

Tipo de adhesivo	Resistencia mínima a 28 días N/mm <sup>2</sup> (Kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>A</b>	8 (80)
<b>B</b>	90 (90)
<b>C</b>	10 (100)

*Materiales auxiliares.*

- ✓ 2 Kg de adhesivo a evaluar.
- ✓ Grasa desmoldante.
- ✓ Agua.

*Equipos, aparatos e instrumentos.*

- ✓ Máquina de compresión.
- ✓ Moldes para especímenes cúbicos de 50 mm por lado.
- ✓ Balanza granataria.
- ✓ Espátula plana de acero inoxidable.
- ✓ Pisón de madera tratada (o de hule comprimido) de aproximadamente 12.5 mm x 25.4 mm x 152.5 mm.

*Preparación del adhesivo.*

Preparar 2 Kg del producto a evaluar según lo descrito en la *Tabla 7*.

Con la espátula de acero inoxidable, se colocó en cada compartimiento del molde una capa del producto a evaluar de aproximadamente 25mm de espesor.

Se compactó el producto que se está evaluando en cada compartimiento utilizando el pisón; la manera de compactarlo es la siguiente: 32 compactaciones en unos 10 s, en 4 vueltas. Cada vuelta en un ángulo recto a la anterior con ocho apisonados en cada vuelta. Cada vuelta en un ángulo recto a la anterior con 8 apisonados en cada vuelta repartidos sobre la superficie total.

Una vez terminado el apisonado de la primera capa, los compartimientos se terminan de llenar con el producto a evaluar; (volver a compactar tal como se hizo en la primera capa) Durante el compactado de la segunda capa, todo el producto que salga que sobresalga del molde después de cada vuelta se regresa al compartimiento con ayuda de la espátula de acero inoxidable.

Al terminar la compactación, se nivela el producto de los moldes para que se obtenga un espesor uniforme, se elimina el exceso del producto.

Se deja el mortero en el molde y se deja reposar a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y 50 % de humedad relativa.

Se remueben los especímenes del molde cuando hayan cumplido 72 horas y almacenan 25 días adicionales.

### *Ruptura de los cubos.*

Se hace el ensayo a los 7, 14 y 28 días del fraguado.

Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de prueba en la platina inferior y centrada con respecto al cabezal esférico superior. Antes de comenzar se verifica que el cabezal esférico superior no esté inclinado. Llevar el cabezal esférico hasta que esté en contacto con la superficie del espécimen.

Se aplicó la velocidad de carga a una relación relativa de movimiento entre la platina inferior y superior correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 N/s -1800 N/s (200 Ib/s -400 Ib/s).

### *Cálculos y expresión de resultados.*

Se calcularon la resistencia a la compresión de la siguiente manera:

$$F_c = \frac{F}{A}$$

Dónde:

$F_c$  es la resistencia a la compresión.

F es la fuerza o carga aplicada en N (0.1 Kgf).

A es el área de sección transversal, asumir 25.0 cm<sup>2</sup> de área de sección transversal para cada cubo.

Se reportar el promedio de los especímenes.

#### ***4.2.7.2 Resistencia a la tensión en función al tiempo (Resistencia a la adherencia).***

*Materiales auxiliares.*

Se mantienen todos los materiales de ensayo bajo condiciones normalizadas al menos 24 h antes de las pruebas

9 piezas cerámicas de 5 cm x 5 cm de tipo muro (absorción de 135 a 15 %). Deben de ser nuevas, estar limpias, secas.

Placa de concreto descrita anteriormente.

Equipos aparatos e instrumentos.

- ✓ Platos para tensión.- Plato cuadrados metálicos, con dimensiones de 50 mm ± 0.5 mm x 50 mm ± 0.5 mm y un espesor mínimo de 10 mm con un dispositivo de acoplamiento apropiado para conectarse con la máquina de prueba de tensión.
- ✓ Una máquina de prueba de tensión por tracción directa, con capacidad y sensibilidad apropiada para la prueba. La máquina debe poder aplicar una carga a la cabeza del plano de tracción con una velocidad de 250 N/s ± 50 N/s a través del dispositivo de acoplamiento sin causar deformación.

- ✓ Llana dentada de 6 mm x 6 mm con una separación de dientes de 6mm.
- ✓ Pesa de sección cuadrada de 5 cm x 5 cm y 2 kg.

*Procedimiento.*

Se aplicó una capa delgada de adhesivo previamente mezclado como se especifica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la placa de concreto con el borde liso con una llana dentada. Después se aplicó una capa más gruesa y se peina la superficie con la llana dentada. La llana debe meterse a una inclinación aproximada de 60° con respecto a la superficie de la placa, al ras de la placa de concreto quedando hilos de aproximadamente 5 mm.

Se espera 5 minutos y se aplican entonces nueve piezas cerámicas en el adhesivo dejando entre ellas una separación de aproximadamente 50 mm. Se repite el paso a los

10 min y 15 min (*Tabla 10*) para cada pieza se debe colocar una pesa de 2 Kg durante 30 s.

La aplicación de las piezas debe realizarse como se indica en la *Tabla 10*.

**Tabla 10. Aplicación de las piezas cerámicas.**

Tipo de adhesivo	Tipo de cerámica	5 min	10 min	15 min	Resistencia a la tensión mínima en N/mm <sup>2</sup>
A	Cottoforte	X	X		0.5
B	Cottoforte	X	X		0.5
C	Cottoforte	X	X	X	0.5

Después de 27 días de almacenamiento en condiciones de ensayo, se pegan las placas metálicas para tracción a las piezas cerámicas con adhesivo adecuado para altos esfuerzos (adhesivo epóxico).

Después de un total de 28 días de almacenamiento bajo condiciones normalizadas se determina la resistencia a la tensión del adhesivo a través de la aplicación de un esfuerzo de tensión que incrementa con una razón constante de 250 N/s  $\pm$  50 N/s

*Cálculo y expresión de los resultados.*

Los valores individuales de resistencia a la tensión se determinan con aproximación de 0.01 N/mm<sup>2</sup> aplicando la siguiente fórmula:

$$Rt = \frac{F}{A}$$

Dónde:

Rt es el esfuerzo a la tensión individual en N/mm<sup>2</sup>.

F es la fuerza a tensión total en N; y

A es el área total de los especímenes en mm<sup>2</sup> (2500 mm<sup>2</sup>).

La resistencia a la tensión para cada supuesto de ensayo se determina de la siguiente forma:

Se determinaron la medida de los 9 valores;

Destacaron los valores que quedan fuera de la banda de  $\pm$  20 % del valor medio;

Determinaron el tipo de falla de cada probeta.

Las *Tabla 10* y *Tabla 11* resumen las especificaciones de las mezclas adhesivas en función de su tipo.

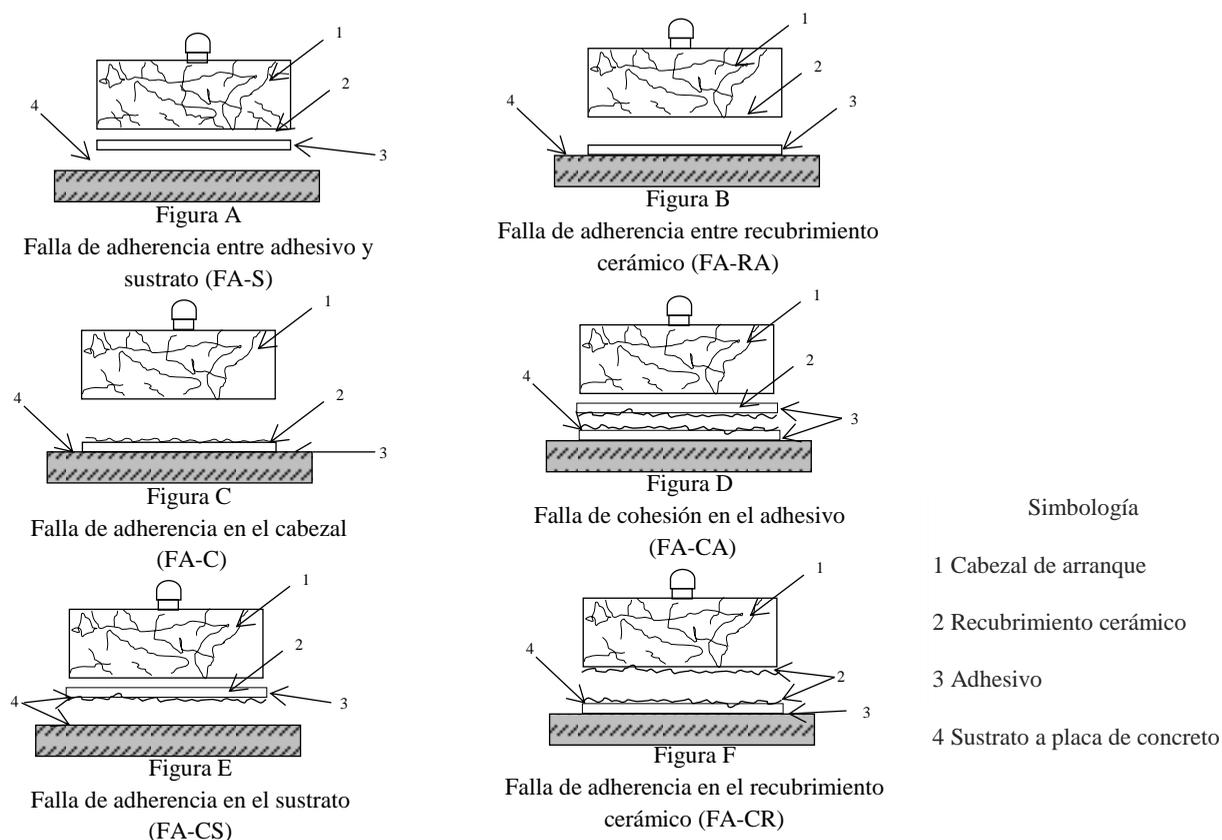


Figura 23. -Tipos de falla.

Tabla 11. Resumen de especificaciones.

Tipo de loseta cerámica	Tipo de adhesivo	Tiempo abierto por el método de porcentaje cubierto	Resistencia a la tensión en función al tiempo	Resistencia mínima a la compresión	Deslizamiento máximo opcional
Para Muro	A	10'	10'	8	0.5
Cottoforte	A	10'	10'	8	0.5
Semigresificada	A	10'	10'	8	0.5
Gresificada	B	10'	10'	10	0.5
Porcelánica	C	15'	15'	10	0.5
Condiciones de la norma		Mínimo 50% cobertura	Mínimo 0.5 N/mm <sup>2</sup>	N/mm	mm

La loseta cerámica en la medición de tiempo abierto y resistencia a la tensión en función del tiempo es: Cottoforte.

Tabla 12. Resumen de especificaciones.

Cerámica tipo	Tipo de adhesivo	Resistencia mínima a la tensión			Cerámica usada para prueba
		Condiciones estándar	Inmersión en agua	Envejecimiento a 70° C	
Para Muro	A	0.5 N/mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	---	Cottoforte
Cottoforte	A	0.5 N/mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	---	Cottoforte
Semigresificada	A	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	---	Cottoforte
Gresificada	B	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	Gresificada
Porcelanica	C	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	0.5 N/ mm <sup>2</sup>	Porcelánica

### 4.3 ETAPA 3. Desarrollo de cuatro nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos propuestos como alternativa tecnológica sustentable.

En una tercera etapa, teniendo la caracterización química y mineralógica del residuo geológico y definido las propiedades de los adhesivos comerciales, se desarrollaron formulaciones propias con base en cemento blanco, polvo generado por el corte y laminado de rocas volcánicas de composición principalmente dacítica (residuo geológico), microsferas de aluminosilicato, un aditivo y un fluidificante.

Es decir se evaluaron las propiedades físicas (peso volumétrico suelto y compacto, peso específico y granulometría), así como propiedades en el estado fresco (determinación de la fluidez) y propiedades en estado sólido (resistencia a la compresión y pesos específicos y resistencia a la adherencia), siguiendo paso a paso la norma de calidad.

### 4.4 ETAPA 4.- Adición de microsferas de aluminosilicato y aditivos para mejora sus propiedades.

En una cuarta etapa se adiciona microsferas de aluminio silicato a las formulaciones de adhesivos propios y se realiza la caracterización de los adhesivos resultantes. (Véase *Tabla 13 Formulación 2*).

Por último se evaluó la adición de aditivos. Estos aditivos son un fluidificante para controlar la fluidez de la mezcla (*Colloid 589 DD®*) (formulación 3) y un segundo

aditivo (*Peramin*®) que en principio puede mejorar las propiedades adhesivas de la mezcla de adhesivos propios. (Véase *Tabla 13*).

La *Tabla 13*. muestra los componentes de cada formulación.

**Tabla 13. Composición porcentual en peso de las formulaciones diseñadas y evaluadas.**

<b>Componentes</b>	<b>Formula 1</b>	<b>Formula 2</b>	<b>Formula 3</b>	<b>Formula 4</b>
<b>Cemento Blanco</b>	38%	41%	41%	42%
<b>Dacita</b>	38%	31%	30%	32%
<b>M 200S</b>		1.00%	1.00%	1.10%
<b>Colloid 589 DD®</b>			0.10%	0.10%
<b>Peramin®</b>				0.10%
<b>Agua</b>	23%	26%	28%	25%
<b>Relación A/C</b>	0.61	0.64	0.69	0.59

#### **4.5 ETAPA 5.- Evaluación y comparación de resultados.**

Finalmente se evaluaron las características de las formulaciones desarrolladas en esta investigación, comparando los resultados con los de las formulaciones que se comercializan actualmente, contrastando estos parámetros con las Normas Mexicanas.

Capítulo V.

RESULTADOS Y

DISCUSIÓN

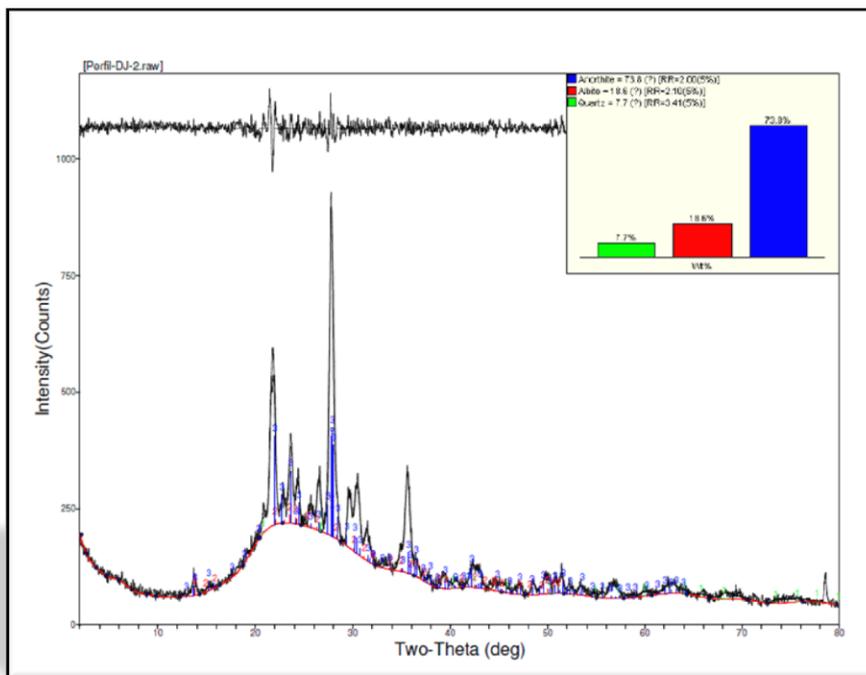
## Capítulo 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante la determinación y caracterización de cuatro adhesivos comerciales contrastados con cuatro formulaciones propias desarrolladas a lo largo de esta investigación, esto se llevó a cabo siguiendo paso a paso las distintas normas mexicanas de calidad descritas anteriormente.

### 5.1 Etapa 1 y 2. Caracterización mineralógica y química del material geológico residual.

#### 5.1.1.- Difracción de Rayos X.

El Difractograma de rayos X muestra que la composición del residuo geológico producto de la actividad de laminado de tobas e ignimbritas volcánicas procedentes de la cantera de Jonacapa es cuarzo y feldespato mayoritariamente como se muestra en la gráfica 1.



**Grafica 1 Difractograma cuantitativo de la muestra de la toba volcánica de la cantera Jonacapa, Mpio. de Huichapan, Hidalgo.**

**5.1.2.- Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-MS).**

En la (

*Tabla 14*) se presentan los resultados que arrojó el estudio de ICP-MS. Este estudio se realizó en Canadá, en el laboratorio Actlabs.

**Tabla 14. Del estudio de ICP-Ms de la muestra de roca volcánica proveniente del corte y laminado de cantera para la industria de la construcción.**

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).										
Símbolo de análisis	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(T)</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Unidad	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Límite de detección	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01
Método de análisis	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP
Muestra Jonacapan	66.5	14.13	3.81	0.06	0.7	2.71	3.77	3.74	0.465	0.17

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).										
Símbolo de análisis	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Hg	Ir	Mo	Ni
Unidad	Ppm	ppm	Ppm	Ppm	ppm	ppm	Ppm	ppb	ppm	ppm
Límite de detección	0.5	1	1	0.5	1	0.5	1	5	2	1
Método de análisis	TD-ICP	INAA	INAA	INAA	TD-ICP	INAA	INAA	INAA	TD-ICP	TD-ICP
Muestra Jonacapan	< 0.5	6	16	2.6	29	6.2	< 1	< 5	3	3

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).										
Símbolo de análisis	LOI	Total	Au	Ag	As	Ba	Be	Bi	Br	
Unidad	%	%	ppb	ppm	ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Límite de detección		0.01	5	0.5	2	3	1	2	1	
Método de análisis	FUS-ICP	FUS-ICP	INAA	MULT INAA/ TD-ICP	INAA	MULT INAA/FUSICP	FUS-ICP	TD-ICP	INAA	
Muestra Jonacapan	3.11	99.17	< 5	0.7	7	594	3	< 2	< 1	

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).								
Símbolo de análisis	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Mass
Unidad	ppm	Ppm	Ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	g
Límite de detección	3	5	0.1	0.1	0.5	0.1	0.05	
Método de análisis	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA	INAA
Muestra Jonacapan	59	28	5.9	0.8	< 0.5	3.2	0.15	1.044

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).

Símbolo de análisis	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sr	Ta
Unidad	ppm	ppm	%	ppm	Ppm	ppm	Ppm	ppm
Límite de detección	5	20	0.001	0.2	0.1	3	2	1
Método de análisis	TD-ICP	INAA	TD-ICP	INAA	INAA	INAA	FUS-ICP	INAA
Muestra Jonacapan	9	110	0.094	0.2	8.2	< 3	236	< 1

Plasma Acoplamiento por Inducción - Espectrometría de Masas (ICP-Ms).

Símbolo de análisis	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	La
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	ppm
Límite de detección	0.5	0.5	5	3	1	1	2	0.2
Método de análisis	INAA	INAA	FUS-ICP	INAA	FUS-ICP	TD-ICP	FUS-ICP	INAA
Muestra Jonacapan	8.8	2.5	31	< 3	38	79	285	35.3

Con el análisis de ICP-MS de toba del banco de Jonacapa se utilizaron los diagramas de TAS (*Total Alkalis vs Silica*) y la Clasificación de rocas volcánicas según *Peccerillo y Taylor, 1981* estableciendo como tipo de roca una dacita ácida de la serie Calcoalcalina de arco, esto en función de la abundancia de SiO<sub>2</sub> en porcentajes en peso. (Véase ) y Diagrama de K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> % en peso mostrando las tendencias evolutivas, mayores (Wilson, 1991) (Véase Figura 25)

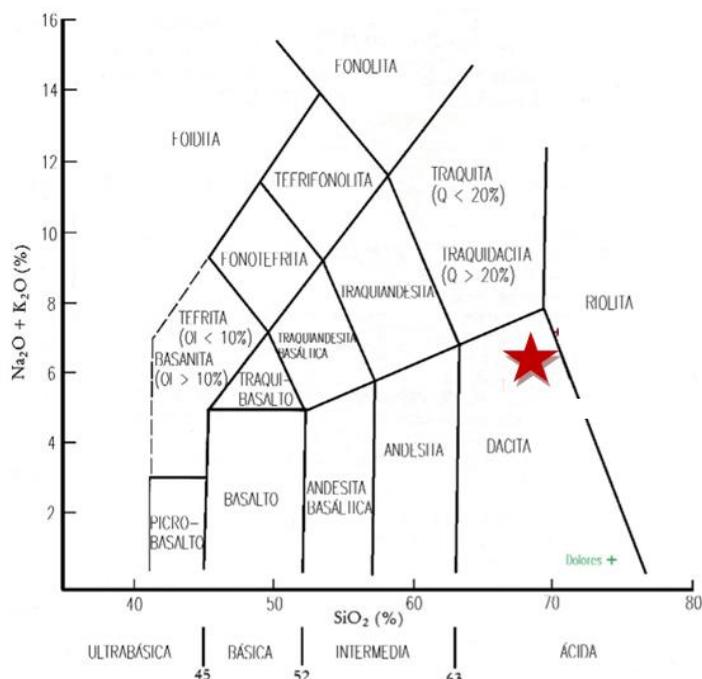


Figura 24. Diagrama TAS (*Total Alkalis vs Silica*) para la clasificación de rocas volcánicas de acuerdo al contenido de SiO<sub>2</sub> v Na<sub>2</sub>O = K<sub>2</sub>O.

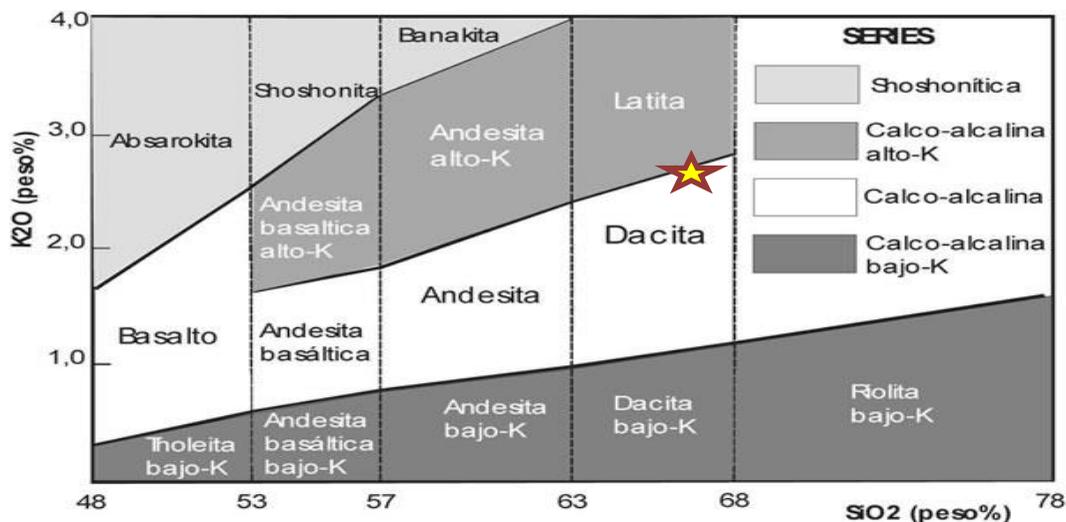
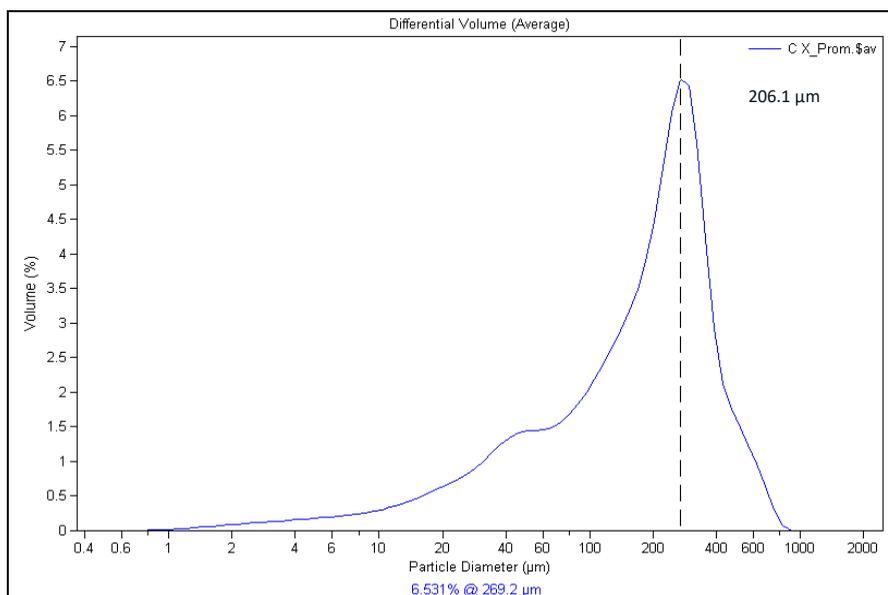


Figura 25. Diagrama de  $K_2O$  vs  $SiO_2$  % en peso mostrando las tendencias evolutivas, mayores (Wilson, 1991)

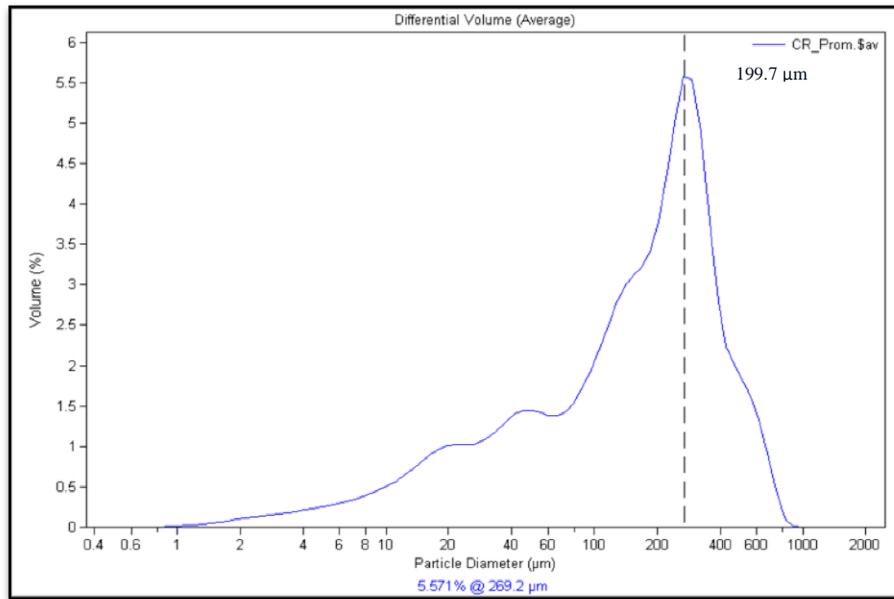
La muestra mandada a caracterización se trata de una toba piroclástica de caída (*ash-fall*) de composición dacítica, según el diagrama el diagrama de  $K_2O$  vs  $SiO_2$  % en peso. (Wilson, 1991).

### 5.1.3.- Análisis de Tamaño de Partícula (ATP).

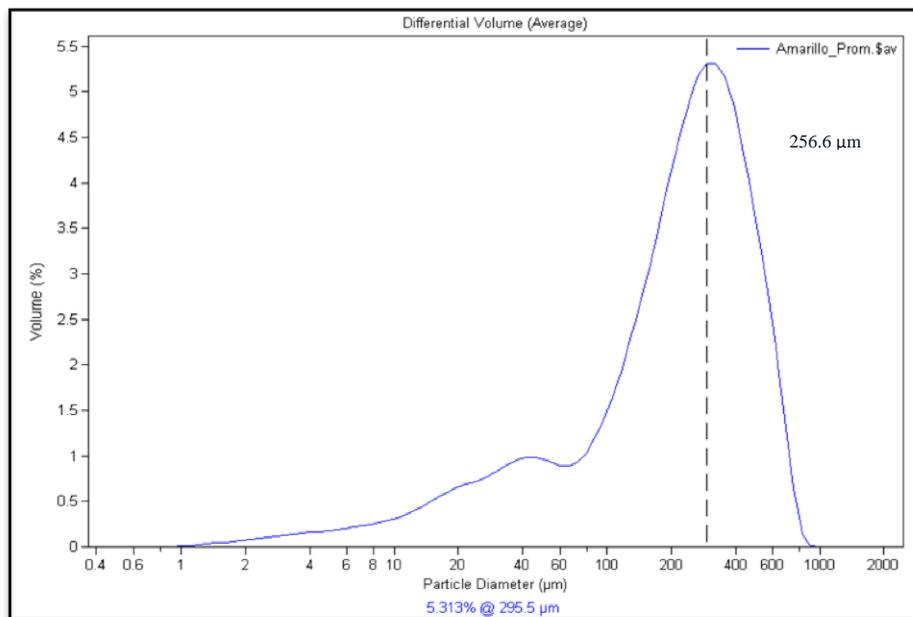
Los análisis de tamaño de partícula arrojan que los adhesivos tiene una distribución homogénea, con un tamaño de partícula que oscila entre los 200 y 257  $\mu m$ . Esto se corrobora en el las imágenes a detalle del MEB.



Grafica 2. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial Sansón blanco Bexel® teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 206.1  $\mu m$ .

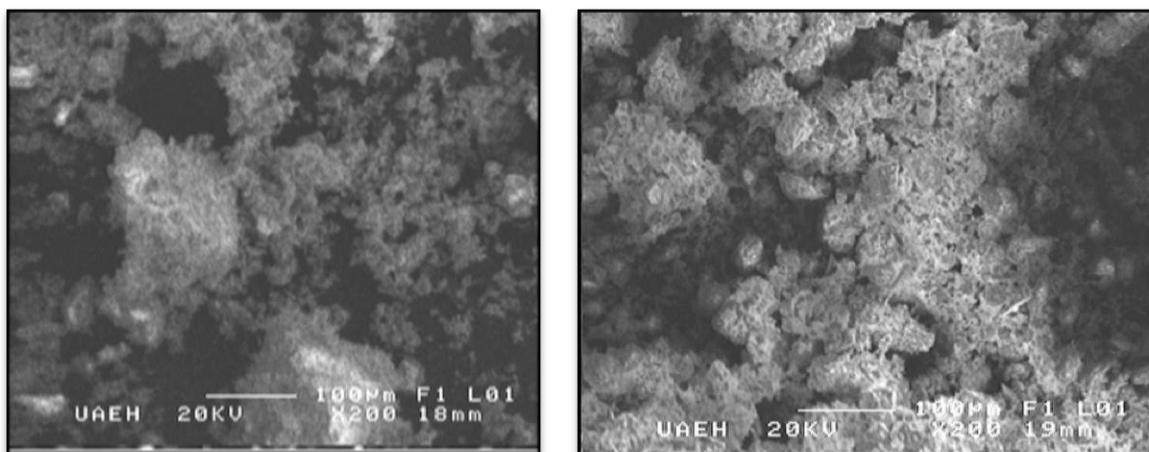


**Grafica 3. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial blanco Crest<sup>®</sup> teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 199.7  $\mu\text{m}$ .**

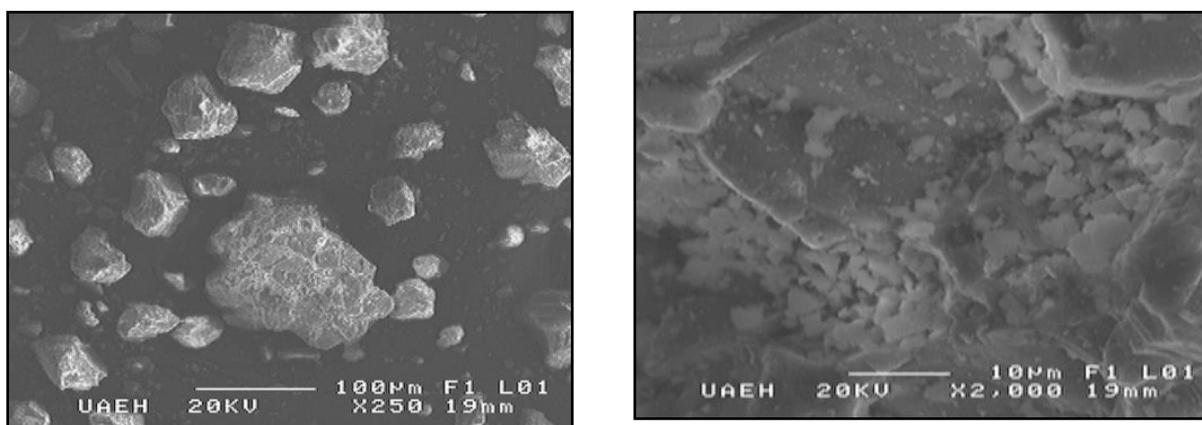


**Grafica 4. Distribución de Tamaño de Partícula (ATP) del adhesivo comercial blanco Premier Antideslizamiento Interceramic<sup>®</sup> teniendo un tamaño de partícula homogénea con un tamaño de partícula de 256.6  $\mu\text{m}$ .**

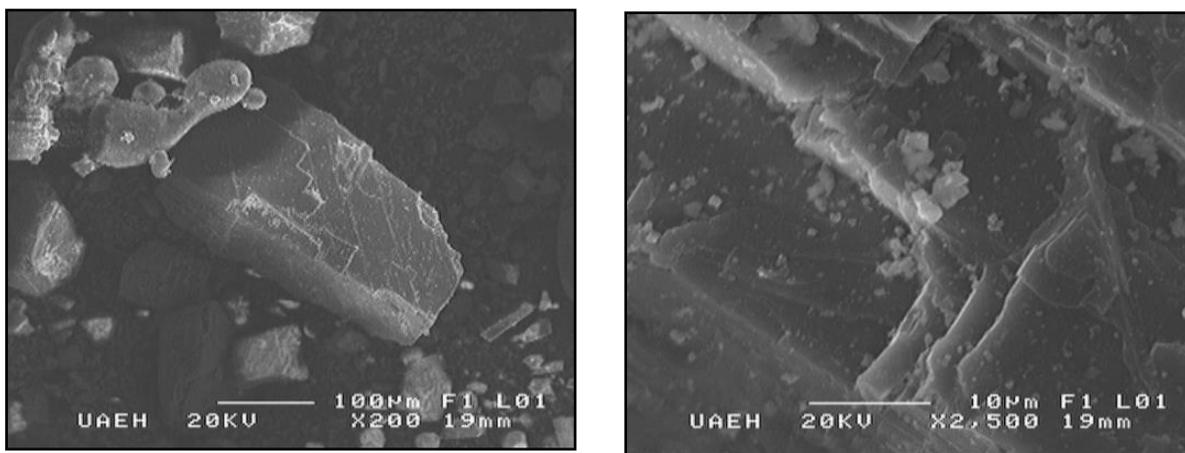
**Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).**



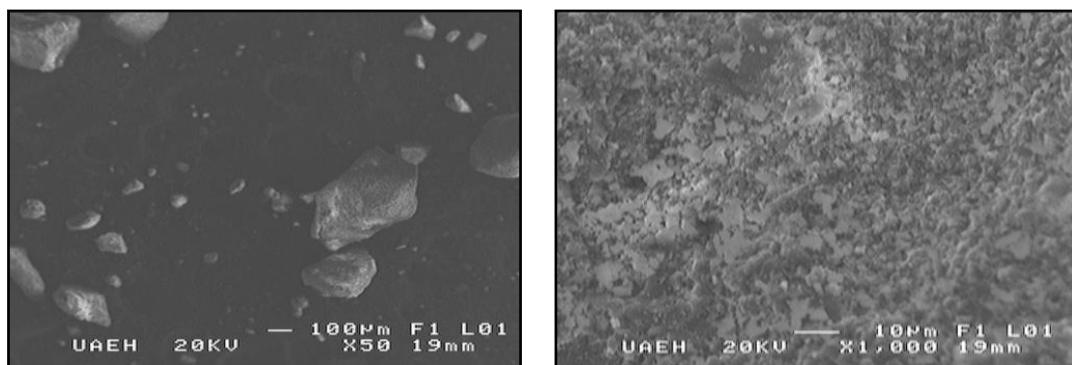
**Figura 26. Fotomicrografía de MEB de la toba piroclástica de composición dacítica del Municipio de Huichapan a 200X.**



**Figura 27. Fotomicrografía del MEB del adhesivo comercial Sansón blanco Bexel® a 250X y 2000X.**



**Figura 28. Fotomicrografía de MEB del adhesivo comercial blanco Crest® a 200X y 2500X.**

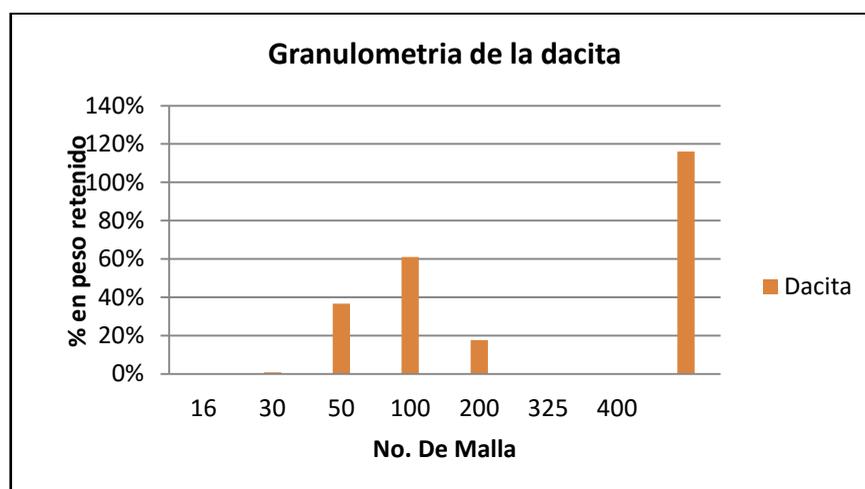


**Figura 29. Fotomicrografía de MEB del adhesivo comercial blanco Premier Antideslizamiento Interceramic® a 50X y 1000X.**

**Tabla 15. Granulometría de la roca volcánica procedente del corte y laminado de cantera para la industria de la construcción. (Dacita).**

TOBA PIROCLÁSTICA DE COMPOSICIÓN DACÍTICA						
Malla	Tamaño mm	Gramos	Porcentaje	Acumulado	Min	Max
4	9.52	0	0%	100%	95%	100%
8	4.76	0	0%	100%	80%	100%
16	2.38	0	0%	100%	60%	95%
30	1.19	0	0%	100%	40%	80%
50	0.59	0	0%	100%	20%	60%
100	0.297	126	25%	100%	8%	30%
200	0.149	98	20%	75%	2%	10%
325	0.074	150	30%	55%	1%	5%
charola	0.034	125	25%	25%	0%	2%
<b>TOTAL:</b>		499	100%	0%	0%	1%

El polvo de roca volcánica (residuo geológico de composición dacítica), resultado de la operación de corte y laminado para la industria de la construcción, tiene un peso específico de  $1.25 \text{ g/cm}^3$ , (Véase Tabla 18) y tamaño de partículas que oscila entre 0.297 y 0.074 mm. (Véase Grafica 5).



Grafica 5. Granulometría del residuo geológico (polvo de roca volcánica de composición dacítica).

### 5.2 Etapa 3. Desarrollo y caracterización de cuatro nuevas formulaciones de adhesivos cerámicos.

En una tercera etapa se desarrollaron y evaluaron formulaciones propias de adhesivos cerámicos con base en cemento blanco, polvo generado por el corte y laminado de cantera dacita fundamentalmente. Estas formulaciones se evaluaron de igual forma que los cementos comerciales. En la *Tabla 16* se muestra los componentes de cada formulación propia.

Tabla 16. Composición porcentual en peso de las formulaciones diseñadas y evaluadas.

Componentes	Formula 1	Formula 2	Formula 3	Formula 4
<b>Cemento Blanco</b>	38%	41%	41%	42%
<b>Dacita</b>	38%	31%	30%	32%
<b>M 200S</b>		1.00%	1.00%	1.10%
<b>Colloid 589 DD<sup>®</sup></b>			0.10%	0.10%
<b>Peramin<sup>®</sup></b>				0.10%
<b>Agua</b>	23%	26%	28%	25%
<b>Relación A/C</b>	0.61	0.64	0.69	0.59

### 5.3 Caracterización de formulaciones propias.

#### 5.3.1.- Efecto de los componentes en las propiedades físicas.

##### 5.3.1.1 Pesos volumétricos.

Los pesos volumétricos sueltos y compactos de los adhesivos desarrollados se presentan en la *Tabla 17* cuyos valores van entre los  $0.86 \text{ g/cm}^3$  de PVS y  $1.08 \text{ g/cm}^3$  en PVC.

**Tabla 17. Pesos volumétricos sueltos y compactos de los adhesivos desarrollados.**

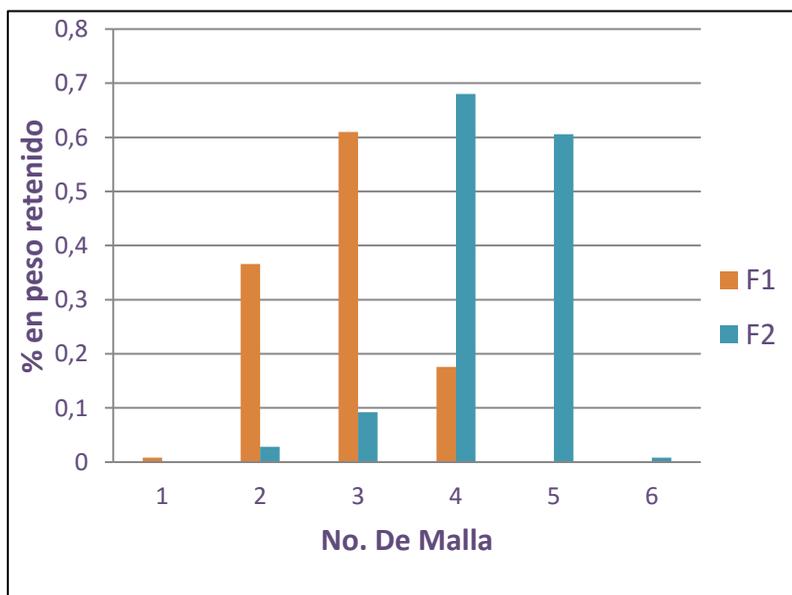
ADHESIVOS PROPIOS	CARACTERIZACIÓN FÍSICA		
	Pesos Volumétricos ( $\text{g/cm}^3$ )		Pesos específicos $\text{g/cm}^3$ (picnómetro)
	PVS	PVC	
FORMULACION 1 F1	0.95	1.33	DACITA 1.25
FORMULACION 2 F2	0.86	1.08	
FORMULACION 3 F3	0.86	1.08	C BLANCO 1.76
FORMULACION 4 F4	0.86	1.08	

##### 5.3.1.2 Pesos específicos.

Los pesos específicos de los adhesivos comerciales, sin microesferas (F1), son del orden de  $1.85$  (Véase *Tabla 18*). La adición de microesferas reduce el peso específico a un valor medio de  $1.73 \text{ g/cm}^3$ , lo que favorece la reducción del peso específico de los adhesivos y también tiene un efecto positivo en el incremento de la fluidez, lo que representa una cualidad adicional de estas nuevas formulaciones. (*Tabla 19*).

**Tabla 18. Valores de pesos específicos de las formulaciones propias.**

ADHESIVOS PROPIOS.	PESOS VOLUMETRICOS ( $\text{g/cm}^3$ )	
	PESO FRESCO	PESO AL DESMOLDAR
FORMULACION 1 F1	1.864	1.840
FORMULACION 2 F2	1.776	1.752
FORMULACION 3 F3	1.736	1.712
FORMULACION 4 F4	1.776	1.752



**Grafica 6. Granulometría de formulaciones propias.**

### 5.3.2.- Efecto de los componentes en estado fresco.

#### 5.3.2.1 Efecto de los componentes en la fluidez

El adhesivo sin microesferas (F1) presenta una fluidez de 102 %. La adición de microesferas ayuda a incrementar la fluidez (F2) en un 122.5%, pero la adición del aditivo *Peramid*<sup>®</sup> reduce la fluidez (F3) a un valor de 75%. La adición del reductor de agua *Colloid 589DD*<sup>®</sup> favorece el incremento de la fluidez, siendo con esta formulación la que muestra la mayor fluidez. El empleo este aditivo fluidificante en la formulación F4 incrementa la fluidez en un 22% con respecto a la fluidez de la formulación 2 que no los contiene. (Véase Tabla 19 ).

La fluidez de los materiales comerciales varía desde 33% al 83% Tabla 19 y los desarrollados en esta investigación van desde 75% hasta 150%, representando una mejora del 45 % en comparación con las mezclas comerciales. (Véase Tabla 19 ).

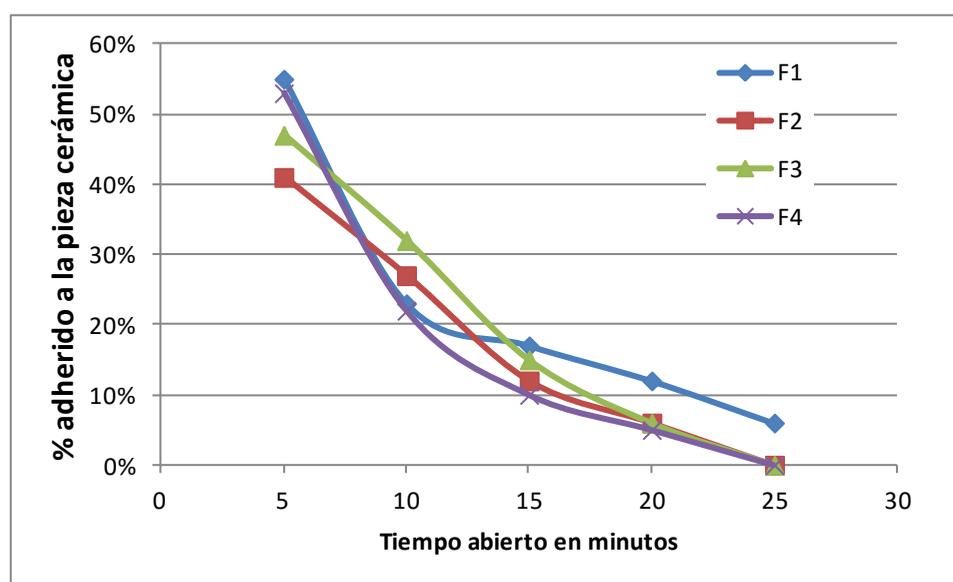
En este punto, el uso de aditivo reductor de agua *Peramin*<sup>®</sup> favorece no solo la fluidez sino también las propiedades mecánicas de los adhesivos desarrollados, como son la resistencia a la compresión y la adherencia. (Véase Tabla 20).

Tabla 19. . Valores de fluidez y tiempos abiertos en formulaciones propias

ADHESIVOS PROPIOS	CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO		
	Fluidez mm	Tiempos abiertos	
		Min	%
FORMULACION 1 F1	102.13	25	55, 23,17,12,6
FORMULACION 2 F2	122.5	20	41,27,12,6
FORMULACION 3 F3	75	20	47,32,15,6
FORMULACION 4 F4	150	20	53,22,10,5

### 5.3.2.2 Efecto de los componentes en tiempos abiertos.

En términos generales los tiempos abiertos de los adhesivos desarrollados se encuentran en el rango de 25 a 35 minutos, lo que permite una velocidad adecuada de colocación de los cerámicos y un secado adecuado para la fijación de los mismos. La adición de microesferas de aluminosilicato reduce el tiempo abierto, al igual que la adición de los aditivos para incrementar la fluidez y la adherencia. (Véase Grafica 7).



Grafica 7. Tiempo abierto en minutos de los adhesivos desarrollados.

#### 5.4 Etapa 4.- Adición de microesferas de aluminosilicato y aditivos.

La adición de microesferas y el aditivo *Peramin*<sup>®</sup> y *Colloid 589 DD*<sup>®</sup> mejoraron las propiedades de adherencia y fluidez de las formulaciones desarrolladas en esta investigación, esto se puede observar en las *Tablas 19 y 20*.

##### 5.4.1.- Efecto de los componentes en las propiedades en estado sólido.

###### 5.4.1.1 Efecto en la resistencia a la adherencia y a la compresión.

Por último se evalúan las propiedades adhesivas y de resistencia a la compresión de las formulaciones propias. La adición de microesferas reduce ligeramente la resistencia a la compresión, pero aumenta la resistencia a la adherencia, probablemente debido a que también mejora la fluidez de la mezcla incrementa la adhesión entre las fases. La adición del *Peramin*<sup>®</sup>, favorece el incremento de la adherencia con el cerámico, aunque reduce ligeramente la resistencia a la compresión. Finalmente la adición del *Colloid 589 DD*<sup>®</sup> favorece ambas propiedades mecánicas, lo cual se puede correlacionar una mayor fluidez que favorece el mojado del adhesivo sobre el cerámico y una menor relación agua cemento en la formulación. (Véase

*Tabla 20 formulación 4*). El uso de aditivos mejora las propiedades mecánicas a la compresión y de adherencia en las formulaciones desarrolladas en este trabajo.

La resistencia a la compresión de los adhesivos comerciales está por debajo de 100 kg/cm<sup>2</sup>, con excepción de uno que presentó una resistencia del orden de 194 kg/cm<sup>2</sup>. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NMX-C-420-ONNCCE-2003) la resistencia mínima establecida es de 100 kg/cm<sup>2</sup> para el tipo C (porcelánica), por lo que varios de los adhesivos comerciales no cumplen con este parámetro.

Los adhesivos desarrollados en este trabajo mostraron una resistencia a la compresión de 199 y hasta 272.7 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de fraguado, estos valores están por encima de la norma de calidad hasta en un 120 % más resistente. (Véase *Tabla 20*).

**Tabla 20. Caracterización de formulaciones propias en estado sólido. Resistencia a la compresión y resistencia a la adherencia.**

ADHESIVOS COMERCIALES	CARACTERIZACIÓN EN ESTADO SOLIDO			
	Resistencia a la compresión			Resistencia a la adherencia
	kg/cm <sup>2</sup>			
	7 días	14 días	28 días	lbf (Kg)
<b>FORMULACION 1 F1</b>	148.7	268.6	272.7	80 (36)
<b>FORMULACION 2 F2</b>	84,57	237	220.77	300 (136)
<b>FORMULACION 3 F3</b>	90.5	183.5	199	380 (172)
<b>FORMULACION 4 F4</b>	122.66	227	235.17	850 (386)

### 5.5 Etapa 5 Caracterización de adhesivos comerciales.

#### 5.5.1.- Determinación de la granulometría de acuerdo a Norma NMX-C-077-1997-ONNCCE.

Esta Norma Oficial Mexicana establece el método para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, con el fin de determinar la distribución de las partículas de diferentes tamaños por medio de cribas.

Dado que los adhesivos comerciales están formados por mezclas de agregados y cemento, éstos fueron caracterizados inicialmente desde el punto de vista granulométrico. Los ensayos muestran que los adhesivos comerciales están formados por partículas no mayores a malla 30, por lo que desde el punto de vista granulométrico se pueden considerar como agregados sumamente finos. (Véase Tabla 21,

Tabla 22, Tabla 23,

Tabla 24).

Tabla 21. Granulometría de adhesivo comercial Sansón Blanco Bexel®.

<b>ADHESIVO COMERCIAL SANSÓN BLANCO BEXEL®</b>						
<b>Malla</b>	<b>Tamaño mm</b>	<b>Gramos</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
4	9.52	0	0%	100%	95%	100%
8	4.76	0	0%	100%	80%	100%
16	2.38	0	0%	100%	60%	95%
30	1.19	1	0%	100%	40%	80%
50	0.59	101	20%	100%	20%	60%
100	0.297	84	17%	80%	8%	30%
200	0.149	117	23%	63%	2%	10%
325	0.074	170	34%	39%	1%	5%
400	0.034	26	5%	5%	0%	2%
<b>TOTAL:</b>		499	100%	0%	0%	1%

Tabla 22. Granulometría de adhesivo comercial Blanco Crest®.

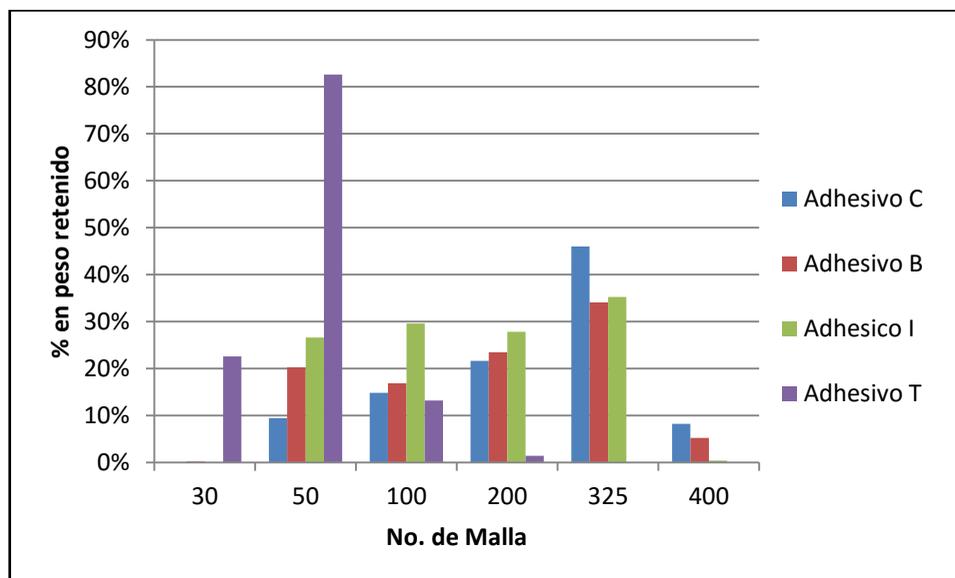
<b>ADHESIVO COMERCIAL BLANCO CREST®</b>						
<b>Malla</b>	<b>Tamaño mm</b>	<b>Gramos</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
4	9.52	0	0%	100%	95%	100%
8	4.76	0	0%	100%	80%	100%
16	2.38	0	0%	100%	60%	95%
30	1.19	0	0%	100%	40%	80%
50	0.59	47	9%	100%	20%	60%
100	0.297	74	15%	91%	8%	30%
200	0.149	108	22%	76%	2%	10%
325	0.074	230	46%	54%	1%	5%
400	0.034	41	8%	8%	0%	2%
<b>TOTAL:</b>		500	100%	0%	0%	1%

Tabla 23. Granulometría de adhesivo comercial Blanco Premier Antideslizante Interceramic®.

<b>ADHESIVO COMERCIAL BLANCO PREMIER ANTIDESLIZAMIENTO INTERCERAMIC®</b>						
<b>Malla</b>	<b>Tamaño mm</b>	<b>Gramos</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
4	9.52	0	0%	120%	95%	100%
8	4.76	0	0%	120%	80%	100%
16	2.38	0	0%	120%	60%	95%
30	1.19	0	0%	120%	40%	80%
50	0.59	133	27%	120%	20%	60%
100	0.297	148	30%	93%	8%	30%
200	0.149	139	28%	63%	2%	10%
325	0.074	176	35%	36%	1%	5%
400	0.034	2	0%	0%	0%	2%
<b>TOTAL:</b>		598	120%	0%	0%	1%

Tabla 24. Granulometría de adhesivo comercial Termolita®.

ADHESIVO COMERCIAL TERMOLITA®						
Malla	Tamaño mm	Gramos	Porcentaje	Acumulado	Min	Max
4	9.52	0	0%	120%	95%	100%
8	4.76	0	0%	120%	80%	100%
16	2.38	0	0%	120%	60%	95%
30	1.19	113	23%	120%	40%	80%
50	0.59	413	83%	97%	20%	60%
100	0.297	66	13%	15%	8%	30%
200	0.149	7	1%	1%	2%	10%
325	0.074	0	0%	0%	1%	5%
400	0.034	0	0%	0%	0%	2%
TOTAL:		599	120%	0%	0%	1%



Gráfica 8. Granulometría de los adhesivos comerciales.

La Gráfica 8, muestra que la distribución de tamaño de grano de la adhesivo comercial *Crest*®, *Bexel*®, e *Interceramic*® es muy parecida, teniendo un tamaño de partícula entre los 0.074 y 0.034 mm mayoritariamente, a diferencia del *Termolita*®, cuyo tamaño de grano es de 0.590 mm mayoritariamente.

### **5.5.2.- Determinación de pesos volumétricos sueltos y compactos de acuerdo a Norma NMX-C-073-2004 de las materias primas.**

La Norma Mexicana es parte de una serie de normas destinadas a métodos de prueba, para determinar la masa volumétrica de los agregados. Establece el método de prueba para la determinación de la masa volumétrica de los agregados finos y gruesos o de una combinación de ambos. Este método es aplicable a agregados cuyo tamaño máximo nominal no excedan de 150 mm.

Se determinó el peso volumétrico suelto y compacto (PVS y PVC) de los adhesivos comerciales. Como se observa en la *Tabla 25*, en el adhesivo marca *Bexel*<sup>®</sup> los pesos volumétricos son los mayores, probablemente debido al tipo de componentes que lo

forman. Estos resultados concuerdan con los pesos volumétricos reportados, en el sentido de que a menor tamaño de partícula mayor peso volumétrico.

Las muestras de adhesivos comerciales se prepararon empleando la cantidad de agua recomendada por cada marca comercial. En cada una de ellas se determinaron propiedades de fluidez, peso específico, adhesión y resistencia a la compresión.

### **5.5.3.- Determinación del peso específico de acuerdo a la Norma NMX-C-164-ONNCCE-2002.**

Esta Norma Mexicana establece el método de prueba para la determinación de la masa específica y la absorción del agregado grueso.

Una porción del agregado seco se sumerge en agua aproximadamente 24 horas, con una tolerancia de  $\pm 4$  hora, con el fin de saturarlo y se seca superficialmente con una franela o papel absorbente. Se toma una muestra a la cual se le determina la masa inicial, se seca y se pesa para determinar la masa constante. Con estos datos se pueden calcular las masas específicas y la absorción de agua.

Con relación al peso específico determinado en cada una de las formulaciones comerciales se observa una relación inversa entre el peso volumétrico y el peso específico al desmolde; resultados que se reportan en la *Tabla 25*

**Tabla 25. Pesos Volumétricos sueltos y compactos de los adhesivos comerciales, así como pesos específicos.**

ADHESIVOS COMERCIALES	CARACTERIZACIÓN FÍSICA			
	Pesos Volumétricos g/cm <sup>3</sup>		Peso Fresco g/cm <sup>3</sup>	Peso al desmoldar g/cm <sup>3</sup>
	PVS	PVC		
BEXEL <sup>®</sup>	1.75	2.01	1.664	1.64
CREST <sup>®</sup>	1.57	1.83	1.776	1.752
INTERCERAMIC <sup>®</sup>	1.37	1.85	1.802	1.777
TERMOLITA <sup>®</sup>	0.87	1.48	2.226	2.223

## 5.6 Caracterización en propiedades en estado fresco.

### 5.6.1.- Determinación de la fluidez de las mezclas cemento – agua de acuerdo a la Norma NMX –C-144-ONNCCE 2001.

La fluidez es una medida de la consistencia de la pasta de cemento expresada en términos del incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un medio cono, después de sacudir un número específico de veces.

El ensayo para determinar la fluidez se realiza en una mesa de sacudidas (*Véase Figura 20*) en la que se coloca la muestra en el medio cono, se deja la muestra en el molde por 1 minuto y luego se retira el molde quedando la muestra sobre el plato de la mesa de sacudidas. Se inicia una secuencia de 25 golpes y se realiza 5 medidas del diámetro de la muestra expandida por los golpes. La sumatoria de estas medidas debe de dar  $105 \pm 5$  mm.

Respecto a la fluidez, tal y como se observan los resultados en la

Tabla 26, la fluidez en los adhesivos comerciales varía desde un 33% (correspondiente al adhesivo *Bexel*<sup>®</sup>) hasta un 83% (correspondiente al adhesivo *Interceramic*<sup>®</sup>). Esto muestra que no parece haber algún valor recomendado para la fluidez. Sin embargo, un 33% de fluidez es una pasta bastante “seca” y la fluidez más adecuada está en rango del 60 al 70%.

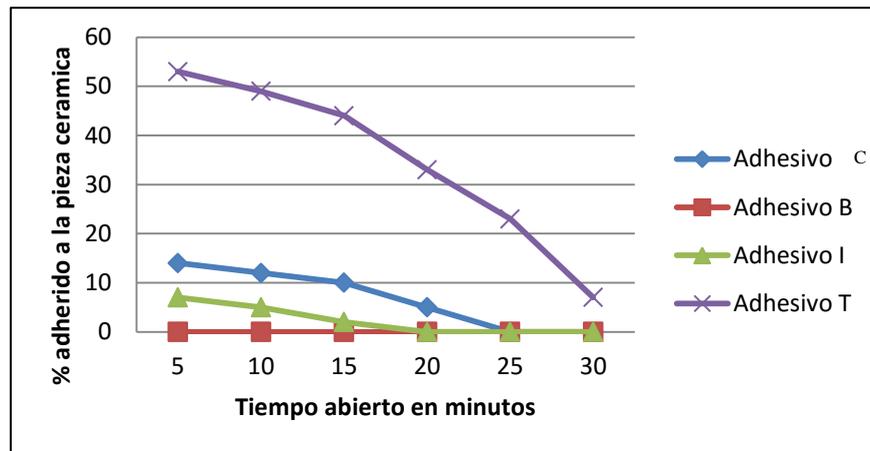
**Tabla 26. Fluidez y tiempos abiertos de adhesivos comerciales**

ADHESIVOS COMERCIALES	CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO		
	Fluidez mm	Tiempos abiertos	
		Min	%
<b>BEXEL</b> <sup>®</sup>	33.62	20`	14,12 10,5
<b>CREST</b> <sup>®</sup>	58.95		Infinito
<b>INTERCERAMIC</b> <sup>®</sup>	83.02	15`	7,5,2
<b>TERMOLITA</b> <sup>®</sup>	63.5	30`	53,49,44,33,23,7

#### 5.6.2.- Determinación del tiempo abierto en estado fresco de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003.

Otro parámetro que se evalúa en los adhesivos en estado fresco, es el tiempo abierto. Este parámetro corresponde al tiempo máximo en el que el adhesivo conserva su propiedad adhesiva y es aún factible colocar una pieza cerámica.

El adhesivo comercial *Crest*<sup>®</sup> tiene un tiempo abierto infinito, lo que redundará en una baja adherencia y fraguado seco muy rápido de tal forma que no cumple con la norma de calidad. Los adhesivos *Bexel*<sup>®</sup> e *Interceramic*<sup>®</sup> tienen un tiempo abierto de entre los 20 y 15 minutos, cumpliendo con la norma; a diferencia del *Termolita*<sup>®</sup>, cuyo tiempo abierto es mayor que todos. (Grafica 9).



**Grafica 9. Tiempo abierto de adhesivos comerciales.**

## 5.7 Caracterización en propiedades en estado sólido.

### 5.7.1.- Determinación de la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003.

Desde el momento en que los granos del cemento inician su proceso de hidratación comienzan las reacciones de endurecimiento, que se manifiestan inicialmente con el fraguado y continúan luego con una evidente ganancia de resistencias, al principio de forma rápida y disminuyendo la velocidad a medida que transcurre el tiempo.

La velocidad de ganancia de resistencia mecánica del concreto depende de numerosas variables y resultan muy diferentes entre unos y otros concretos. De esas variables, la más importante puede ser la composición química del cemento, la misma finura, la relación agua - cemento, que cuanto más baja sea favorece la velocidad, la calidad intrínseca de los agregados, las condiciones de temperatura ambiente y la eficiencia de curado. Esto hace que los índices de crecimiento de la resistencia no pueden ser usados en forma segura o precisa con carácter general para cualquier concreto.

El adhesivo cerámico es una masa endurecida que por su propia naturaleza es discontinua y heterogénea. Las propiedades de cualquier sistema heterogéneo dependen

de las características físicas y químicas de los materiales que lo componen y de las interacciones entre ellos. Con base en lo anterior, la resistencia del concreto depende principalmente de la resistencia e interacción de sus fases constituyentes:

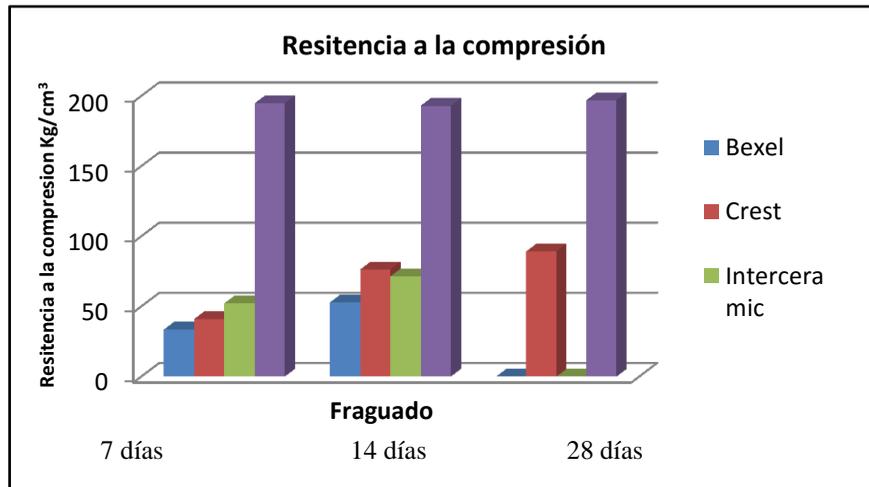
- La resistencia de la pasta hidratada y endurecida (matriz).
- La resistencia de las partículas del agregado.
- La resistencia de la interfase matriz-agregado.

La resistencia a la compresión exhibida por los adhesivos comerciales, después de haber sido curados 28 días, muestran valores desde 69 kg/cm<sup>2</sup> (para el adhesivo *Bexel*®) hasta 197 kg/cm<sup>2</sup> (para el adhesivo *Termolita*®). De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NMX-C-420-ONNCCE-2003), la resistencia mínima establecida es de 100 kg/cm<sup>2</sup> para el tipo C (porcelánica), por lo que varios de los adhesivos comerciales no cumplen con este requerimiento (*Tabla 27 y*

Grafica 10).

**Tabla 27. Caracterización de productos comerciales en estado sólido. Resistencia a la compresión, pesos específicos y resistencia a la adherencia.**

CARACTERIZACIÓN EN ESTADO SOLIDO					
ADHESIVOS COMERCIALES	Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>			Pesos específicos g/cm <sup>3</sup> (picnómetro)	Resistencia a la adherencia <i>lb<sub>f</sub></i> (kg)
	7 días	14 días	28 días		
<b>Bexel</b> ®	33.55	53	68,9	1.76	50 (22.6)
<b>Crest</b> ®	41.01	76.42	89.2	2.2	100 (45.2)
<b>Interceramic</b> ®	52.24	71.57	80,16	2.2	650 (295)
<b>Termolita</b> ®	194.75	193.1	197	1.76	600 (272)



**Grafica 10. Resistencia a la compresión de adhesivos comerciales a los 7, 14 y 28 días de fraguado.**

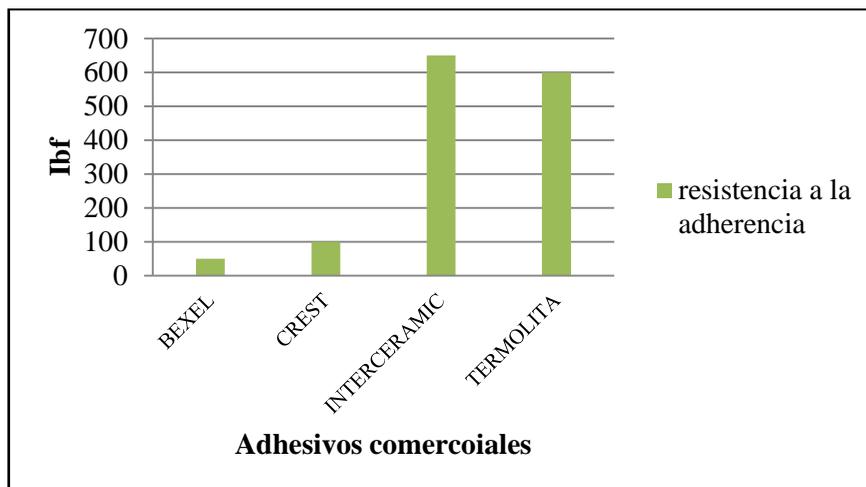
### 5.7.2.- Determinación de resistencia a la adherencia de acuerdo a la norma NMX-C-420-ONCCE-2003.

La adherencia es una característica propia de los morteros de albañilería es la propiedad que poseen los morteros de adherirse a los materiales con los cuales están en contacto (rocas, ladrillos, acero, etc.). Ésta es la propiedad fundamental que deben cumplir los morteros.

Esta Norma Mexicana establece las especificaciones y métodos de prueba para las mezclas adhesivas formuladas a partir de cementos de importación o fabricación nacional para su uso o comercialización en la República Mexicana, cuyo destino es la fijación o colocación de recubrimientos cerámicos y de piedras naturales.

El peso específico y la resistencia a la adherencia en los adhesivos es muy variable, lo que indica que hay una gran variedad en su composición (tipos de agregados y porcentajes) lo que genera tener adhesivos con muy bajo poder de adherencia y resistencia a la compresión como es el caso del adhesivo *Bixel*<sup>®</sup>.

Grafica 10 y Grafica 11).



**Grafica 11. Resistencia a la adherencia en Ibf de los adhesivos comerciales.**

Capítulo VI.

CONCLUSIONES

---

---

## Capítulo 6 CONCLUSIONES.

- ❖ Se caracterizó físico, químico y mineralógicamente el material residual de origen geológico (polvo generado del corte de toba dacítica) como sustituto parcial del cemento blanco y gris en la elaboración de aditivos cerámicos.
- ❖ Se diseñaron y desarrollaron cuatro nuevas formulaciones de adhesivos para la industria cerámica y recubrimientos, utilizando material residual de origen geológico, con la adición de microesferas de aluminosilicato, un aditivo *Peramin*<sup>®</sup>, y un flurificante *Colloid 589 DD*<sup>®</sup> para mejorar sus propiedades.
- ❖ Mediante las diferentes normas de calidad para la industria de la construcción, referentes a los cementos cerámicos, se determinaron las propiedades físicas, propiedades en estado fresco y las propiedades en estado sólido de cuatro adhesivos cerámicos comerciales (*Crest*<sup>®</sup>, *Bexel*<sup>®</sup>, *Interceramic*<sup>®</sup> y *Termolita*<sup>®</sup>) para obtener sus propiedades y poder hacer una comparación de parámetros con las nuevas formulaciones desarrolladas a lo largo de esta investigación, con el fin de aportar un desarrollo tecnológico e innovador además de ser ecológicamente sustentables.
- ❖ Las normas son aparentemente sencillas; sin embargo, es necesario encontrar los parámetros adecuados (pesos volumétricos, granulometría, etc.) para la obtención de cada nueva formulación. Es por ello que se efectuaron diferentes experimentos variando en primer tiempo los pesos de cada compuesto para conocer la cantidad ideal en la obtención de una buena formulación que compitiera con las propiedades de los adhesivos comerciales; posteriormente se fueron variando y probando diferentes flurificantes y aditivos, lo que resultó favorable.
- ❖ Se Identificaron cada uno de los parámetros y reacciones que tiene lugar en el proceso de fraguado de los adhesivos y los distintos tipos de cerámica en los que se implementan.

- ❖ La caracterización con base en las normas de calidad de los cuatro adhesivos cerámicos comerciales y de los adhesivos desarrollados en esta investigación empleando materiales geológicos residuales (de origen dacíticos provenientes de los desechos su corte) y la adición de microesferas de aluminosilicato, muestran entre los valores más importantes lo siguientes:
  - ✓ La fluidez de los materiales comerciales varía desde 33% al 83% y los desarrollados en esta investigación van desde 75% hasta 150%, lo que hace una mezcla manejable y rendidora.
  - ✓ En este punto el uso de aditivo reductor de agua (*Peramid*<sup>®</sup>) favorece no solo la fluidez sino también las propiedades mecánicas de los adhesivos desarrollados como son la resistencia a la compresión y la adherencia.
  - ✓ La resistencia a la compresión de los adhesivos comerciales está por debajo de 100 kg/cm<sup>2</sup>, con excepción de uno que presentó una resistencia del orden de 194 kg/cm<sup>2</sup>. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (NMX-C-420-ONNCCE-2003) la resistencia mínima establecida es de 100 kg/cm<sup>2</sup> para el tipo C (porcelánica), por lo que varios de los adhesivos comerciales no cumplen con este parámetro.
  - ✓ Los adhesivos desarrollados en este trabajo mostraron una resistencia a la compresión de 199 en la formulación 3 y hasta 272.7 kg/cm<sup>2</sup> en la formulación 2 a los 28 días de fraguado, demostrando así que los adhesivos desarrollados en esta investigación están por encima hasta en un 150% mejor que los que se comercializan.
  - ✓ El uso de aditivos favorece las propiedades mecánicas a la compresión y de adherencia.
  - ✓ En cuanto a la resistencia a la adherencia los adhesivos desarrollados en esta investigación se observó una resistencia de 80 lbf y hasta un

- 850 Ibf en la formulación 4 , los adhesivos comerciales tienen valores de 50 Ibf y 600 Ibf. Lo que demuestra nuevamente que los adhesivos desarrollados en esta investigación rebasan en un 250% a los que se comercializan actualmente.
- ✓ El empleo de microesferas favorece la reducción del peso específico de los adhesivos y también tiene un efecto favorable en el incremento de la fluidez como se puede observar en la formulación 2,3 y 4 donde se le adicionó microesferas de aluminosilicato.
  - ✓ El material dacíticos provenientes de los desechos del corte de las rocas dacíticas reducen hasta un 40% el uso del cemento blanco y gris, lo que hace las formulaciones desarrollados en esta investigación una innovación tecnológica utilizando un material de desecho que además ocasiona acumulación y posible contaminación local y regional.
  - ❖ Los resultados obtenidos de estas nuevas formulaciones permiten inferir que los adhesivos desarrollados en este trabajo pueden ser: tecnológicamente adecuados, económicos, ecológicos, sustentables y todo ello favorece la posibilidad de ser empleados industrialmente.

Capítulo VII.  
BIBLIOGRAFÍA

---

---

## Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

**ASTM C321 -00. 2012.** Standard Test Method for Bond Strength of Chemical-Resistant Mortars.

**ASTM C230 -03 / C230M -.** Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.

**ASTM C29-09 / C29M.** Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate.

**ASTM C.117,** Standard Test Method For Materials Finer Than 75 .

**ASTM C117 -13.** Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.

**ASTM C1437 -13.** Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

**ASTM C-136.** Standard Test Method for Sieve Analysis of .

**ASTM C128 -15.** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.

**ASTM-C-109M-98. 1998.** Standard Test Method for Compressive Strength of hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or (50 mm) Specimens).

American National Standard Specification for Latex-Portland Cement Mortar **A118.4.** 1992.

American National Standard Specification for Dry-Set Portland cement Mortar. **A118** 1992.

Aspectos Geológicos Importantes de la Eexploración Geotérmica del Campo de Pathé, Estados de Hidalgo y Queretaro, Geotermia. **Milan, M y J.J. Herrera-F. 1987.** Mexico : Geoener, 1987, Vol. 3. 31-39.

Ampliación de Estudio Geoloíco de las Zonas Geotermicas de Yenthó, Pathé y Taxidó, Hidalgo, México. Mexico : CFE, 1982. 68-83. **Milan, M. 1982.**

---

**C109, ASTM.** Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars .

**C136, ASTM.** Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates Quiz.

Cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona : Técnicos Asociados S.A/ISBN 847146-192-7, **Fernando, Gomá.**1979.

Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México . [aut. libro] Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México - Huichapan. México: **INAFED, 2014.**

Exploracion geológica de la Caldera de Huichapan, Estyado de Hidalgo. **Yáñez, C. 1984.** (Resumen), s.l. : Sociedad Geologica, Vol. VII. 171.

Geología del Sureste del Estado de Hidalgo y del Noreste del Estado de Mexico. **Segerstrom, K. 1961.** 13, s.l. : Geol, Petrol, 1961. 3-4.

Geología y Geoquímica de Elementos Mayores de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. **M. Milán, C, Yáñez, I Navarro-L,S.P. Verma y G. Carrasco-Niñez. 1992.** 2, Mexico : s.n., Vol. 32. 261-276.

Geologic Evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican volcanic Belt, Mexico. **Gerardo J. Aguirre-Días, Margarita López Martínez. 2008.** 179, s.l. : ELSEVIER, 2008. 133-148.

Geology and geochemistry of Amealco Caldera, Queretaro, Méxic. In: **SP. Verma, S.P., G. Carrasco-Nuñez y M. Milan. 1991a.** 47, s.l. : VERMA, 1991a. 105-127.

Geología del área Tequisqueapa-Cardonal, Estado de Hidalgo y Querétaro. México : Escuela Superior de Ingenieria y Arquitectura, Instituto Politecnico Nacional, 59. **Ortoño-Arzate, S. 1981.**

**MMX-C-077-1997-ONNCC. 1997.** Industria de la Construcción. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**MX-C-111-ONNCCE-2004.** Industria de la Construcción. Agregados para Concreto Hidráulico. Especificaciones y Métodos de Prueba.

---

Manual Tecnológico del Cemento. Barcelona : Técnicos Asociados, S.A., **H., Walter. 1977.**

Prontuario del Cemento. Barcelona : Técnicos Asociados, S.A. **Kohlhaas, y Otto 1985.**

Pueblos de México. Pueblos de México - Huichapan Pueblo Magico Hidalgo. Mexico : **INAFED.**

**Norma IRAM.1986** Mezclas Adhesivas, a base de ligantes hidráulicos, para la colocación de revestimientos cerámicos – Método de ensayo de adherencia.

**NMX-C-077-1997-ONNCCE.** Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-170.1998** Industria de la Construcción-Agregados-Reducción de la muestra de agregados, obtenidas en el campo al tamaño requerido para la prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-B-231.1999** Industria Siderúrgica -Cribas para la clasificación de materiales granulares - Especificaciones. s.l. : Diario Oficial de la federación.

**NMX-B-231-1990,** Cribas para clasificación de materiales granulares. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-008-SCFI-1993.** Sistema General de Unidades de medida NMX-C-251-1997-ONNCCE Industría de la Construcción. – Concreto. – Terminología. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-073-ONNCCE- 2004.** Industria de la construcción – Agregados – Masa volumétrica – Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-077-ONCCE-2004.** ndustria de la construcción. Agregados para concreto hidráulico. Análisis granulométrico método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-083-ONNCCE-2002.** Industria de l,a Construcción - Concreto - Determinacion de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto - Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

- 
- NMX-C-083-ONNCCE-2002.** Industria de la construcción-concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-084.** Industria de la construcción- Agregados concreto, partículas más finas que la criba no. 0.075 mm (200) por medio de lavado- Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-085-ONNCCE. 2002.** Industria de la construcción. – Cementantes hidráulicos. – Método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004.** Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Prueba.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004.** Industria de la construcción. Agua para concreto-. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-144-ONNCCE -2002.** Industria de la Construcción – Cementos hidráulicos – Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros con cementantes hidráulicos. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-159-ONNCCE- 2004.** Industria de la Construcción. Elaboración y curado en laboratorio de especímenes de concreto o la norma. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-160-ONNCCE-2004.** Industria de la Construcción. Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-165-ONNCCE-2004.** Industria de la Construcción – Agregados – Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado fino – Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-166.** Industria de la Construcción -Agregados -Contenido total de humedad por secado - Método de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-183-ONNCCE- 1974.** Industria de la construcción. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

---

**NMX-C-191-ONNCCE-1997.** Industria de la construcción .Concreto fresco – Muestreo. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-192-ONNCCE-2006.** Industria de la construcción. Determinación del número de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-414-ONNCCE-2004.** Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-420-ONNCCE-2003.** Industria de la construcción – Mezclas adhesivas para colocación de recubrimientos cerámicos y piedras naturales – Especificaciones y métodos de prueba. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NMX-C-O30-ONNCCE. 2004.** Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NOM-002-SCFI.** Productos pre-envasados- Contenido neto, tolerancia y métodos de verificación. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**NOM-030-SCFI.** Información comercial- Declaración de cantidad en la etiqueta. s.l. : Diario Oficial de la Federación.

**UNE-EN-1066-1997, Norma Española.** Adhesivos. – Toma de muestras.

**UNE-EN-1067-1997, Norma Española.** Adhesivos. - Examen y preparación de muestras ara ensayo.

**UNE-EN-1308/A1-1999, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. - Determinación del deslizamiento.

**UNE-EN-1308-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. - Determinación del deslizamiento.

**UNE-EN-1322-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. - Definiciones y terminología.

**UNE-EN-1323-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. – Placas de hormigón para ensayos.

**UNE-EN-1324/A1-1999, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación de la resistencia a la cizalladura de los adhesivos de dispersión.

**UNE-EN-1324-1999, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación de la resistencia a la cizalladura de los adhesivos de dispersión.

**UNE-EN-1346/A1-1999, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación del tiempo abierto.

**UNE-EN-1346-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación del tiempo abierto.

**UNE-EN-1347/A1-1999, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación de la capacidad humectante.

**UNE-EN-1347-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación de la capacidad humectante.

**UNE-EN-1348-1997, Norma Española.** Adhesivos para baldosas cerámicas. –  
Determinación de la resistencia a la tracción de los adhesivos cementosos.