



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Campo de Conocimiento: Tecnología



DISEÑO DE COMPUESTO DE MATRIZ CERÁMICA REFORZADO CON FIBRAS CON CAPACIDAD ENERGÉTICA ESTRUCTURAL

Tesis que para optar por el grado de

Maestro en Arquitectura, Campo de Tecnología

Presenta

César Alejandro Ventura Ruiz Esparza

Director de tesis

Dr. Humberto Acedo Espinoza – Facultad de Arquitectura

México, Distrito Federal, Ciudad Universitaria

Octubre del 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Director de tesis

Dr. Humberto Acedo Espinoza – Facultad de Arquitectura

Comité Sinodal

Dra. Gemma Luz Verduzco Chirino – Facultad de Arquitectura

Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara – Facultad de Arquitectura

Mtro. Alberto Muciño Vélez – Facultad de Arquitectura

Dr. Fidel Sánchez Bautista – Facultad de Arquitectura

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y su comunidad, por hacer posible el proyecto universitario.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología con cuyo apoyo se logro el desarrollo de este trabajo.

Al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM por la oportunidad de pertenecer a su matrícula.

Al Dr. Humberto Acedo Espinoza por su tiempo, dirección y sustento.

A la Dra Gemma Luz Verduzco Chirino por su disposición, guía y paciencia.

Al Mtro. Alberto Muciño Vélez, al Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara, al Dr. Fidel Sánchez Bautista por su entusiasmo e interés.

Al Centro de Investigaciones en Diseño Industrial de la UNAM, con atención al Laboratorio de Materiales Cerámicos que dignamente dirige la Mtra. Emma Vázquez Malagón, por las facilidades brindadas en la elaboración de probetas.

A la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán, del Instituto Politécnico Nacional, con especial atención al Ing. Juan Francisco Fortis Roa por la colaboración brindada en la caracterización mecánica de las probetas desarrolladas.

Contenido

Introducción

VII

1.0 Cerámicas: características, propiedades y clasificación

	1
1.1 Definición	1
1.2 Microestructura cerámica	1
1.3 Sinterización en los materiales cerámicos	2
1.4 Características generales de las cerámicas	3
1.5 Clasificación de las cerámicas	4
1.6 Expansión térmica	5
1.7 Propiedades mecánicas de las cerámicas	5
1.7.1 Esfuerzo y deformación	5
1.7.2 Elasticidad, Ley de Hooke y Relación de Poisson	6
1.7.3 Elasticidad y fractura frágil	7
1.7.4 Falla de las cerámicas en esfuerzos de compresión y tensión	7
1.7.5 Física de la fractura en los sólidos frágiles	9
1.7.6 Deformación plástica en las cerámicas	9
1.8 Mecánica de la fractura	11
1.8.1 Fuerza Cohesiva Teórica	12

1.8.2 Teoría de la fractura de Inglis.	15
1.8.3 Teoría de la fractura de Griffith	16
1.8.4 Teoría de la fractura de Irwin y el Criterio de la Energía	17
1.8.5 Tipos clásicos de fractura	19
1.9 Porosidad y tamaño de grano en las cerámicas	19
1.10 Mecanismos de refuerzo en materiales cerámicos	20
1.10.1 Refuerzo por desviación de la grieta (crack deflection)	20
1.10.2 Refuerzo por puenteo de la grieta (crack bridging)	21
1.11 Compuestos cerámicos reforzados	22
1.11.1 Fibras	23
1.11.1.1 Fibras vegetales	24
1.11.1.2 Fibras Metálicas	26
1.11.2 Relación fibra matriz	28
1.11.3 Arquitectura del refuerzo y compuestos laminados	29
1.11.4 Regla de las mezclas en materiales compuestos	30
Conclusiones del capítulo	32
2. Cerámicas utilizadas en elementos estructurales	34
2.1 Arcillas utilizadas en la industria de la construcción	34
2.1.1 Sinterización de las arcillas	35

2.2 Piezas de mampostería cerámica	36
2.2.1 Tipos de piezas	36
2.3 Comportamiento de la mampostería ante esfuerzos de compresión y cortante	38
2.4 Resistencia de diseño a flexión en la mampostería	39
2.5 Análisis y diseño estructural en estructuras de mampostería	40
2.5.1 Proceso del diseño estructural	40
2.5.2 Seguridad estructural	40
2.5.3 Acciones	41
2.5.4 Cargas verticales	43
2.5.5 Análisis por cargas verticales	43
2.5.6 Relación de esbeltez	44
2.5.7 Carga excéntrica	44
2.5.8 Cargas laterales	45
2.6 Forma de las unidades que componen la mampostería	46
2.7 Importancia del grosor de las juntas	46
2.8 Calidad de la mano de obra	46
2.9 Piezas industriales de arcilla extruida Novaceramic	46
Conclusiones del capítulo	52
3.0 Propuesta y método experimental	51

3.1 Diseño y fabricación del material compuesto	52
3.1.2 Puntos de fusión, degradación o descomposición	53
3.1.3 Oxidación y reducción	53
3.1.4 Coeficientes de expansión térmica	54
3.2 Producción del compuesto y fabricación de probetas	54
3.3 Síntesis. ASTM E23-12c	57
3.4 Síntesis ASTM C1341-13	59
4.0 Resultados experimentales	64
4.1. Integración del material compuesto de matriz cerámica reforzado con fibras de acero	64
4.1.1 Conclusiones del proceso de integración del material	72
4.2 Prueba de impacto en modalidad IZOD	73
4.2.1 Conclusiones de la prueba de impacto	77
4.3 Ensaye de flexión	81
4.3.1 Comparación del comportamiento a flexión entre el material reforzado y el material tradicional	85
4.3.2 Conclusiones del comportamiento observado ante esfuerzos de flexión	88
4.4 Evaluación del comportamiento mecánico de las fibras de acero inoxidable	89
4.4.1 Conclusiones del comportamiento mecánico de las fibras de acero inoxidable	91
Conclusiones del proceso experimental	92

5.0 Conclusión general y propuesta de continuidad

95

Referencias

100

Índice de figuras

Figura 1. Microestructura de un material cerámico policristalino.	2
Figura 2. Falla en tensión y en compresión en materiales cerámicos.	8
Figura 3. Estructura cristalina de la Caolinita.	10
Figura 4. Modelo de la resistencia cohesiva.	13
Figura 5. Modos de fractura, de izquierda a derecha, I, II, III.	19
Figura 6. Refuerzo por desviación de la grieta.	21
Figura 7. Refuerzo por puenteo de la grieta.	22
Figura 8. Esquema del comportamiento de las cerámicas reforzadas.	23
Figura 9. Estructura morfológica de fibras de algodón y de madera de abeto.	25
Figura 10. Banco de materia prima.	48
Figura 11. Trituradora mecánica.	48
Figura 12. Pieza de barro con alto contenido de humedad.	49
Figura 13. Extrusora mecánica.	49
Figura 14. Piezas de cerámica secas sin sinterizar estibadas.	50
Figura 15. Inyectores de gas del horno túnel.	51
Figura 16. Proceso de empaquetamiento automatizado.	51
Figura 17. Esquema de la probeta y la orientación de las fibras para prueba.	56
Figura 18. Probeta para prueba de impacto tipo Izod (mm.)	58

Figura 19. Arcilla en polvo.	65
Figura 20. Alúmina en polvo.	67
Figura 21. Fibra de acero con revestimiento hidrófugo.	67
Figura 22. Probeta con refuerzo fracturada durante el secado.	69
Figura 23. Probeta sometida a 850°C separada en dos cuerpos.	70
Figura 24. Muestra reforzada sinterizada hasta 400°C sin fisuras observables.	72
Figura 25. Probeta tipo IZOD de 7.5 cm ³ con 1% de fibra en volumen sinterizada a 850°C.	73
Figura 26. Absorción de energía.	78
Figura 27. Tenacidad a la fractura.	79
Figura 28. Probetas IZOD sin refuerzo fracturadas.	80
Figura 29. Probetas IZOD con refuerzo fracturadas.	80
Figura 30. Gráfica fuerza-deflexión en ensaye de flexión, cerámica reforzada.	82
Figura 31. Ensaye de flexión a probeta de cerámica reforzada.	83
Figura 32. Gráfica fuerza-deflexión en ensaye de flexión, cerámica tradicional.	84
Figura 33. Ensaye de flexión a probeta de cerámica tradicional.	85
Figura 34. Resistencia a la fractura en flexión.	86
Figura 35. Resistencia última a flexión.	86
Figura 36. Gráfica esfuerzo-deformación en flexión.	87
Figura 37. Montaje de las fibras de acero inoxidable en el equipo de ensaye.	89
Figura 38. Gráfica esfuerzo deformación en tensión de las tres fibras ensayadas.	90

Índice tablas

Tabla 1. Características típicas de algunas piezas de mampostería.	37
Tabla 2. Resistencia de diseño a la compresión de la mampostería sobre área bruta.	38
Tabla 3. Resistencia de diseño a cortante de la mampostería sobre área bruta.	39
Tabla 4. Composición química del acero inoxidable AISI 316.	52
Tabla 5. Temperatura de producción y fusión de los componentes del compuesto.	53
Tabla 6. Coeficientes de expansión térmica a temperatura ambiente de diversos materiales de construcción.	54
Tabla 7. Probetas IZOD fabricadas.	73
Tabla 8. Tabla de resumen de las propiedades observadas.	77
Tabla 9. Probeta de flexión.	81
Tabla 10. Variables de flexión.	88
Tabla 11. Propiedades de las fibras de acero inoxidable.	91

Introducción

El interés por optimizar las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, específicamente aquellos utilizados en la industria de la construcción, como lo son las arcillas sometidas a un proceso de sinterizado, surge de buscar la posibilidad de transformar un material tradicional en una solución innovadora y de mayor eficiencia.

Con el desarrollo de la investigación fue posible conocer la complejidad y profundidad del mundo de las cerámicas. Materiales con excelentes prestaciones mecánicas y funcionales, sin embargo los aspectos que hasta hace algunos años restringieron su aplicación en condiciones estructurales es uno de los temas que han motivado un gran número de investigaciones, esto es, su fragilidad e inestabilidad de fractura.

Métodos de producción complejos y que incorporan materias primas de alta pureza o altamente industrializadas han sido utilizados para generar compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras. Estos compuestos principalmente utilizados en industrias estratégicas como la aeroespacial o la militar, han demostrado que es posible modificar drásticamente las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, especialmente su resistencia ante esfuerzos donde existen tensiones y su tenacidad de fractura. Haciendo posible su uso de manera segura en condiciones estructurales demandantes.

Para lograr una aplicación exitosa en la industria de la construcción, donde se requieren grandes cantidades de componentes para ejecutar un solo proyecto,

es necesario tener en cuenta que la optimización de un material debe lograrse de una manera sencilla, fácilmente industrializable y que incorpore materias primas no prohibitivas.

Por lo tanto, una vez conocidas las propiedades generales de los materiales cerámicos y los mecanismos existentes para transformar y optimizar la mecánica del material, se desarrolló una propuesta experimental. Esta propuesta logró integrar en una matriz de arcillas y óxido de aluminio, fibras de acero continuas y conjugar en un solo componente los elementos con los que se construyen los tableros arquitectónicos portantes de mampostería.

La integración de materiales cerámicos y metálicos tiene como objetivo combinar las propiedades mecánicas de ambas clases de materiales y lograr así un compuesto con capacidad de trabajar ante esfuerzos de compresión y tensión, esfuerzos presentes en los elementos estructurales donde comúnmente se utilizan piezas cerámicas: los tableros portantes.

Durante el proceso de integración del material fue posible determinar que la arcilla por si sola no puede ser reforzada con fibras de acero continuas, ya que durante el secado de los cuerpos verdes se producen fisuras. Se agregó un material antiplástico para mejorar la contracción de la pasta cerámica, este material se seleccionó con base en sus propiedades mecánicas. Se incorporó óxido de aluminio, uno de los óxidos cerámicos con mejores prestaciones mecánicas.

El resultado fue el desarrollo de un procedimiento que hizo posible integrar un compuesto de matriz cerámica constituido por una pasta de arcillas y óxido de aluminio, reforzado con fibras continuas de acero inoxidable, que ha sido sinterizado a 850°C. Se obtuvieron valores de tenacidad, capacidad de absorción de energía, resistencia, deformación y Módulo de Elasticidad que reflejan la combinación de los materiales, así como propiedades de fractura estable.

El proceso de creación y caracterización del compuesto reforzado constituye el primer paso en la búsqueda de la optimización del proceso constructivo y comportamiento mecánico de los tableros de mampostería de piezas cerámicas de carácter estructural.

1.0 Cerámicas: características, propiedades y clasificación

Existe un interés especial en los materiales cerámicos por parte de la industria de la construcción, esto se demuestra observando la gran cantidad de soluciones que se basan en el uso de estos materiales. Sin embargo, la confusión sobre que es exactamente una cerámica se da de manera generalizada, debido al amplio universo de materiales que pueden clasificarse dentro de esta categoría. El concreto, el barro cocido, los pisos de porcelana, entre otros materiales utilizados en la industria de la construcción son de naturaleza cerámica. Por tal razón es necesario definir con claridad que en la presente investigación nos enfocaremos en las cerámicas que son sometidas a un tratamiento térmico, denominado sinterizado, para constituir piezas estructurales de aplicación arquitectónica, como las arcillas y los óxidos metálicos, entre otros.

1.1 Definición

En palabras de M. Barsoun (Barsoun, 2003) podemos definir a las cerámicas como compuestos sólidos formados por la aplicación de calor, calor y presión, o compresión, a por lo menos dos elementos, donde al menos uno es un Sólido Elemental No-metal y el otro(s) puede ser un metal(es) o un no metal(es). Mientras que un Sólido Elemental No-Metal es aquel sólido unido mediante enlace covalente o iónico, que a temperatura ambiente es aislante ó semiconductor.

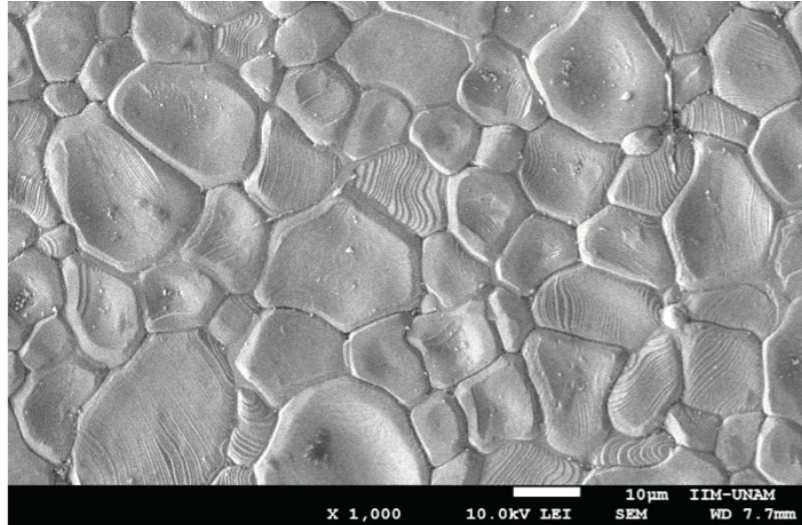
1.2 Microestructura cerámica

Los sólidos cristalinos existen como cristales sencillos cuando su arreglo y estructura atómica es perfecta y se extiende en todo el espécimen sin interrupciones, ó como sólidos policristalinos, donde se unen múltiples cristales sencillos denominados granos, separados por áreas de desorden denominadas límites.

Los granos de los materiales cerámicos generalmente se encuentran entre 1 y 50 μm . (micrómetros). Se conoce como microestructura a la forma, tamaño y

distribución de los granos, así como a su porosidad. Muchas propiedades de las cerámicas dependen del arreglo de su microestructura. En la Figura 1, podemos apreciar la microestructura de un material cerámico tipo BCTZ con granos del orden de los 10 μm .

Figura 1. Microestructura de un material cerámico policristalino.



Fuente. Reyes, A., Foto micrografía SEM: Síntesis y caracterización de materiales electro cerámicos libres de plomo tipo BCTZ, UNAM 2013, p. 57.

1.3 Sinterización en los materiales cerámicos

El proceso de sinterización en los materiales cerámicos consiste en la aplicación de un tratamiento térmico, con o sin la aplicación de presión externa, a un sistema de partículas en forma de un aglomerado poroso compacto previamente formado, en seco o humedecido, con el objetivo de transformarlo en un producto denso y químicamente estable. La unión de las partículas se logra a temperaturas suficientes que estimulen los mecanismos de transporte de masa sin llegar al punto de fusión (Montero, 2013).

1.4 Características generales de las cerámicas

Es imposible definir las propiedades de todos los materiales cerámicos, pero como clase podríamos mencionar las características que la mayor parte de los compuestos comparten, como la fragilidad, la baja conductividad térmica y eléctrica, la alta resistencia a la compresión, su estabilidad química, dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la oxidación (Carter, 2013). Las siguientes son las definiciones de aquellas propiedades de mayor interés para la presente investigación:

Fragilidad. La mejor manera de describir este concepto sería la falla de un sólido de manera repentina, catastrófica y total, sin observar deformación apreciable, mediante la propagación veloz e inestable de una grieta.

Resistencia a la compresión. Entendámoslo como la capacidad de un material de soportar esfuerzos que se aplican en un mismo eje de manera contraria. Es un hecho conocido que las cerámicas son más resistentes a la compresión que a la tensión. Esta característica es importante al utilizar componentes cerámicos en aplicaciones donde se requiere capacidad de carga.

Dureza. Consiste en la resistencia de un material a la deformación plástica focalizada, es importante señalar que es muy difícil medirla en **materiales cerámicos debido a su naturaleza frágil.**

Estabilidad química. Podríamos decir que la estabilidad se logra cuando los gradientes electroquímicos de un sistema o compuesto desaparecen y no son observables cambios en sus propiedades o microestructura. Un gran número de cerámicas son estables tanto en ambientes químicamente agresivos, como en ambientes con condiciones térmicas adversas.

1.5 Clasificación de las cerámicas

Es posible clasificar a los materiales cerámicos en dos grandes grupos con base en su composición química y propiedades, dichos grupos se denominan *cerámicas tradicionales* y *cerámicas avanzadas*. Las cerámicas tradicionales se caracterizan por estar compuestas por materiales base sílice, principalmente arcillas y feldespatos. Su microestructura es porosa, gruesa, poco uniforme y multifase. Existe una tendencia a asociar las cerámicas tradicionales con baja tecnología, sin embargo técnicas avanzadas e industrializadas de producción son utilizadas para conformar productos de cerámicas tradicionales.

Otra clase de materiales cerámicos, denominados avanzados, han logrado desarrollarse a partir de materias primas más sofisticadas, como óxidos binarios, carburos, perovskitas, e incluso materiales totalmente sintéticos para los cuales no hay equivalentes naturales. La microestructura de estas cerámicas se caracteriza por ser de una magnitud más fina, más homogénea y mucho menos porosa que aquella de las cerámicas tradicionales. Por lo tanto exhiben propiedades mecánicas superiores, mayor resistencia a la corrosión y a la oxidación y en algunos casos propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas no convencionales (Barsoum, 2003)(Carter, 2013). Es dentro de esta categoría donde podemos localizar las denominadas *cerámicas estructurales*, donde se ha hecho énfasis en la mejora de las propiedades mecánicas del material.

Propiedades como la dureza, la rigidez, el Módulo de Elasticidad, la resistencia al desgaste, la capacidad de retención a altas temperaturas y la estabilidad química y por tanto la resistencia a la corrosión presentes en los materiales cerámicos, han sido aprovechadas en aplicaciones estructurales. Algunos óxidos cerámicos han logrado resistencias a la flexión de más de 1 GPa, al igual que otros compuestos cerámicos han logrado una resistencia específica mayor a 2 GPa (Basu, 2011). Respecto al Módulo de Elasticidad y a la dureza, las cerámicas poseen valores más elevados que aquellos de los metales refractarios. Un ejemplo sería el óxido de aluminio (también conocido como alúmina Al_2O_3), cuya dureza oscila los 19 GPa, cerca de tres veces más que la del acero inoxidable martensítico totalmente endurecido (alrededor de 7 GPa) (Basu, 2011).

Un alto Módulo de Elasticidad provee a las cerámicas una excelente resistencia al daño por contacto. Sin embargo es muy importante tener en cuenta que una de las mayores limitaciones de las cerámicas estructurales es su pobre resistencia a la fractura. El éxito en el uso de cerámicas estructurales y en la obtención de las propiedades deseadas oscila en una cuidadosa selección e integración de la materia prima y en un óptimo proceso de sinterizado.

1.6 Expansión térmica de las cerámicas

Es bien conocido que los sólidos se expanden con el calentamiento. La longitud de la expansión es expresada por el coeficiente de expansión lineal α , definido como el cambio fraccionario en la longitud producto del cambio de temperatura a una presión constante:

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \left(\frac{\delta l}{\delta T} \right)^p$$

donde l_0 es la longitud original. Es importante señalar que generalmente las cerámicas tienen un coeficiente α menor a los metales, y en algunos casos, algunos cristales presentarán encogimiento en una dirección y expansión en otra, esto es un comportamiento térmico anisotrópico (Wachtman, 2009).

1.7 Propiedades mecánicas de las cerámicas

1.7.1 Esfuerzo y deformación

Podemos entender el esfuerzo como cantidad proporcional a la fuerza que causa una deformación. En palabras de E. Peschard, "si una fuerza externa, al actuar sobre el cuerpo modifica las distancias entre las partículas, es decir, produce una deformación, las fuerzas internas sufrirán un incremento a fin de equilibrar la fuerza externa y de oponerse a la deformación; este incremento en las fuerzas internas constituye un esfuerzo" (Peschard, 1969). La deformación

consiste en el cambio de las dimensiones en cualquier dirección del cuerpo o sólido resultado de dicho esfuerzo.

1.7.2 Elasticidad, Ley de Hooke y Relación de Poisson

La propiedad que tienen los cuerpos de regresar a su forma original, al remover la fuerza que los deforma, es conocida como elasticidad. Un cuerpo es elástico cuando la deformación que sufre durante la aplicación de la fuerza desaparece totalmente. Si por el contrario, esta deformación permanece aun después de retirar el esfuerzo, podremos decir que se ha llegado a un estado de plasticidad, propiedad contraria a la elasticidad. Podemos encontrar estados plásticos tanto en esfuerzos de tensión como en compresión. Cuando un sólido es capaz de soportar deformaciones plásticas bajo esfuerzo de tensión, se le denomina dúctil. Así, cuando un sólido es capaz de soportar deformaciones plásticas bajo esfuerzo de compresión, se le llama maleable (Peschard, 1969). La Ley de Hooke establece que dentro de ciertos límites la relación entre el esfuerzo y la deformación de un cuerpo es constante, por lo tanto lineal. Se expresa de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \therefore \sigma = E\varepsilon \therefore \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

donde σ es el esfuerzo unitario, ε es la deformación unitaria, y E es la Constante Elástica del material, ya sea a tensión o a compresión, y es conocida como Módulo de Elasticidad. En el caso del esfuerzo cortante la Ley de Hooke expresa:

$$G = \frac{\tau}{\nu} \therefore \tau = G\nu \therefore \nu = \frac{\tau}{G}$$

donde τ es el esfuerzo unitario, ν es la deformación unitaria y G la constante elástica del material al esfuerzo cortante o Módulo de Rigidez. A la relación entre

las constantes de deformación transversal y longitudinal se le denomina Relación de Poisson, esta establece que:

$$\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \therefore \varepsilon_t = \mu \varepsilon_l$$

donde μ es la Relación de Poisson, ε_t es la deformación unitaria transversal y ε_l es la deformación unitaria longitudinal (Peschard, 1969).

1.7.3 Elasticidad y fractura frágil

En diversos sólidos, incluyendo las cerámicas, la relación lineal entre esfuerzo y deformación se asume para mucho propósitos. Es de suma importancia mencionar que bajo condiciones uniformes de esfuerzo y a temperatura ambiente la falla en las cerámicas se da de manera repentina y total. Es esta falta de ductilidad a temperatura ambiente y la inestabilidad en su fractura lo que ha motivado un continuo esfuerzo en la comunidad científica por lograr nuevos diseños de microestructura que permitan incrementar la resistencia al agrietamiento en las cerámicas (Basu, 2011).

1.7.4 Falla de las cerámicas en compresión y tensión

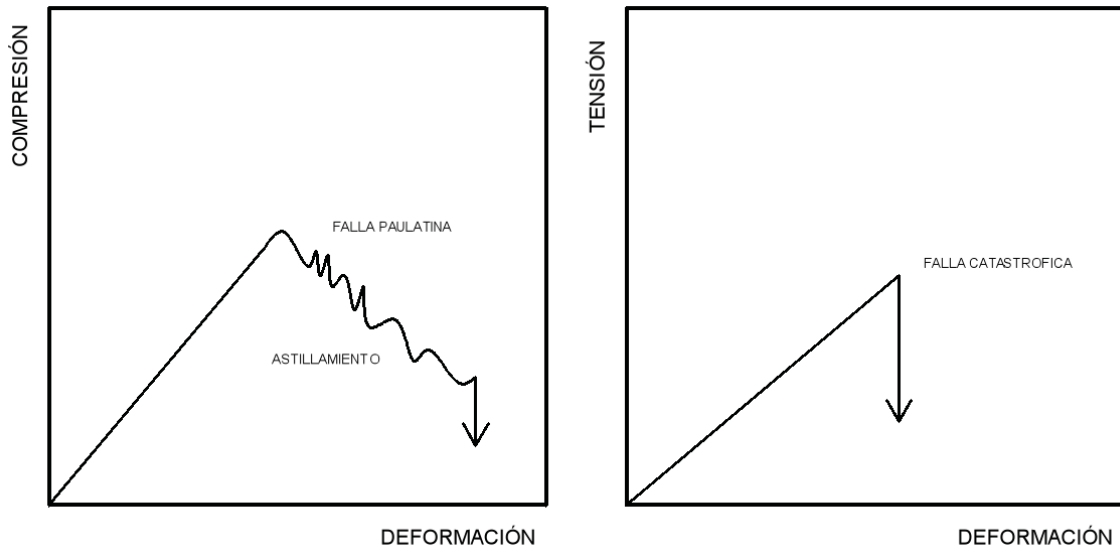
Los materiales cerámicos destacan en su capacidad de soportar grandes esfuerzos de compresión, sin embargo son sumamente débiles cuando se someten a esfuerzos de tensión. La resistencia de las cerámicas a los esfuerzos de compresión llega a ser entre ocho y doce veces mayor que aquella demostrada en los esfuerzos de tensión.

Durante la aplicación del esfuerzo de compresión el material se comportara de una manera elástica perfectamente lineal, hasta llegar a la fractura. Las grietas se extenderán de manera vertical a lo largo de la dirección del eje de

compresión. El material no fallará de manera abrupta bajo los esfuerzos de compresión, sino de manera paulatina debido al astillamiento de pequeños volúmenes del espécimen.

Bajo esfuerzos de tensión las cerámicas fallarán de manera repentina, total y catastrófica. Las grietas se extenderán en un eje perpendicular al esfuerzo de tensión y es en este tipo de esfuerzo donde se presenta la principal variación en los valores de resistencia (Mojsilovic, 2011).

Figura 2. Falla en tensión y en compresión en materiales cerámicos.



Fuente. Basu, B., Esquema: Advanced Structural Ceramics, Wiley 2011, p. 51.

Wachtman, J. Esquema: Mechanical Properties of Ceramics. Wiley 2009, p. 29.

En muchas aplicaciones estructurales, es decir donde se requiere capacidad de carga, la combinación de propiedades de dureza, tenacidad, y confiabilidad en la resistencia son necesarias. Sin embargo las cerámicas se caracterizan por su baja confiabilidad en la resistencia ante esfuerzos de tensión; por ejemplo, especímenes cerámicos idénticos, sometidos a esfuerzo iguales mostrarán una

resistencia distinta, producto de las variaciones en el tamaño, forma y orientación de las grietas respecto al eje del esfuerzo de tensión (Basu, 2011).

1.7.5 Física de la fractura en los sólidos frágiles

La variación en la resistencia de las cerámicas bajo esfuerzos de tensión se debe principalmente a la presencia de grietas de diferentes procedencias y tamaños, es adecuado decir que mientras mayor sea la longitud crítica de la grieta serán menores los valores de resistencia. Las observaciones experimentales sobre este asunto pueden resumirse en los siguientes puntos (Basu, 2011):

- a)** Los materiales frágiles poseen grietas, estas grietas los restringen de lograr sus resistencias potenciales.
- b)** La dispersión en los resultados experimentales se debe a la dispersión de los tamaños de las grietas.
- c)** La resistencia media derivada de una serie de pruebas similares, dependerá del tamaño de la muestra y de la naturaleza del esfuerzo.
- d)** La resistencia no será la misma en especímenes nominalmente idénticos sometidos a condiciones experimentales idénticas.

Es reconocido que la resistencia necesita ser analizada mediante distintos acercamientos estadísticos.

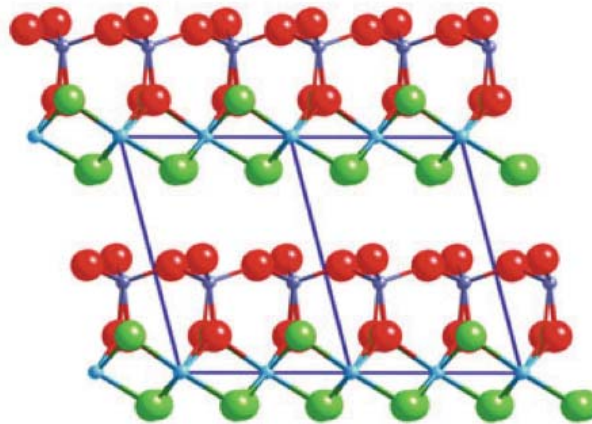
1.7.6 Deformación plástica en las cerámicas

Desde una perspectiva atómica, la deformación plástica corresponde a la ruptura de enlaces entre los átomos vecinos de un sólido y la formación de nuevos enlaces con otros átomos, mientras un gran número de átomos se mueven unos con respecto a otros (Callister, 2012). En los sólidos cristalinos la

deformación se da gracias a un proceso denominado deslizamiento en el cual interviene el movimiento de las dislocaciones¹.

En los materiales cerámicos las estructuras cristalinas son complejas, la distancia de deslizamiento expresada por el Vector de Burgers² es amplia, y los sistemas de deslizamiento atómico son escasos. Estos aspectos se ven reflejados en la necesidad de aplicar un gran esfuerzo en el material para iniciar la deformación plástica. Esta energía o esfuerzo tiene un valor mayor que aquel necesario para propagar cualquier grieta presente en el sólido hasta convertirla en fractura. Podemos observar en la Figura 3 la geometría compleja del arreglo atómico de un material cerámico, a diferencia de los metales donde la estructura es sencilla y regular.

Figura 3. Estructura cristalina de la Caolinita.



Fuente. Carter, B. Esquema: Estructura cristalina de materiales arcillosos. Springer 2013, p. 112.

¹ Defectos en la regularidad de las redes cristalinas de los sólidos.

² Distancia interatómica.

1.8 Mecánica de la fractura

Los defectos y las grietas aparecen en los cuerpos mecánicos y estructurales, por fabricación, por construcción o generados durante su servicio, por lo tanto es necesario analizar su efecto en el comportamiento del cuerpo. La Resistencia de Materiales evalúa la magnitud de los esfuerzos y las deformaciones producidas en un sólido y determina si tiene la suficiente resistencia para soportar esas fuerzas sin deformarse excesivamente ni llegar a la fractura.

La magnitud del efecto interno que se produce al aplicar una fuerza externa es directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional al área sobre la que actúa, esto es F/A . A la relación F/A se le llama esfuerzo y se define como (González, 2005):

$$\sigma = F/A$$

La fractura es la separación de un sólido bajo la acción de una carga externa, a través de un proceso de creación de superficies de fractura. Para fracturar un componente estructural puede ser necesario sostener o incluso incrementar la carga después de que la iniciación de grietas ha tenido lugar, mientras que en otros casos basta con alcanzar el punto de iniciación de la grieta para que esta se propague espontáneamente. Para que la fractura ocurra no es necesario que el esfuerzo de iniciación y propagación de grietas esté presente en todo el volumen de un cuerpo, basta con que este esfuerzo alcance una región estrecha. Este es el conocido principio de la cadena, que establece que para romper una cadena basta con romper un eslabón.

El hecho de que una fractura pueda iniciar en regiones muy localizadas y frecuentemente pequeñas de un sólido y de que ocurra a esfuerzos menores de los de diseño le dan sus características de ser súbita, inesperada y catastrófica.

Se conocen o definen dos tipos de fractura (González, 2005):

Fractura frágil: ocurre cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica, de manera que después de la fractura los fragmentos de la pieza pueden volver a juntarse sin que haya cambios significativos de geometría.

Fractura dúctil: ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo, entendiendo que los esfuerzos en una región relativamente grande de la pieza rebasaron el esfuerzo de cedencia o límite elástico.

Cuando se encuentra una grieta o un defecto que se comporte como tal en el componente mecánico, el análisis previsto por la Resistencia de Materiales cambia por completo. Los desplazamientos y deformaciones serán mayores en la región de la grieta, habrá una concentración de esfuerzos en el extremo de la grieta y con esto una deformación local muy superior a la deformación total. Las grietas generan tres principales efectos desfavorables en los materiales: reducción de la capacidad de soportar cargas, desempeño inadecuado, reducción de la vida útil.

La mecánica de fractura considera que el proceso de fractura inicia con una grieta que se propaga hasta la separación final o fragmentación de la pieza. Si durante la propagación de la grieta ésta puede detenerse al disminuir o desaparecer los esfuerzos, se dice que la propagación es **estable**, y si la grieta se propaga de manera rápida, auto acelerada y es prácticamente imposible de detener, entonces la propagación es **inestable**.

1.8.1 Fuerza Cohesiva Teórica

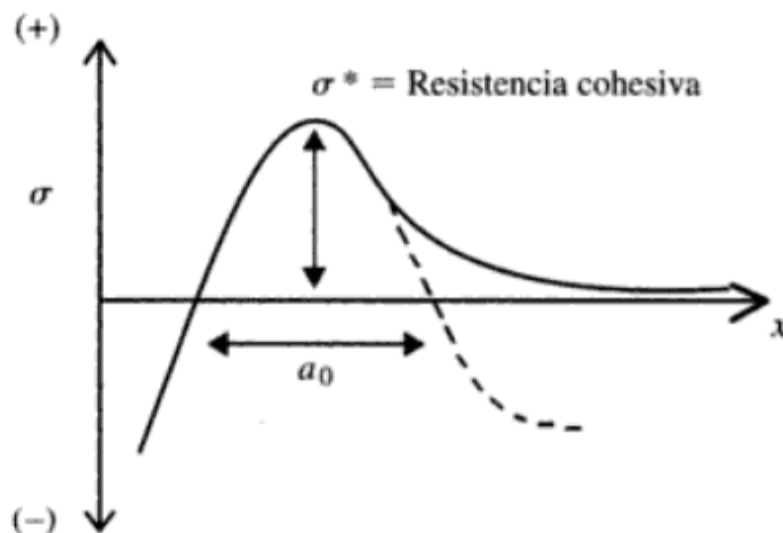
La teoría inicial de fractura por fragilidad se basa en la ruptura de los enlaces interatómicos o teoría de ruptura, que resulta en la generación de dos superficies adicionales. Se asume que se presentará una relación lineal de

esfuerzo y deformación en el sólido cerámico, seguida por la ruptura de los enlaces que provocará la falla catastrófica (Basu, 2011).

El modelo más simple de la fractura es la separación directa de planos en un material cristalino. En la separación de planos el esfuerzo de fractura es el esfuerzo necesario para separar y romper los enlaces atómicos en el plano de fractura, esta resistencia es denominada resistencia cohesiva.

La resistencia cohesiva varía con la separación interatómica. Cuando la separación en el plano de fractura es igual a $a_0/2$, donde a_0 es la distancia interplanar, la resistencia cohesiva es alcanzada y ocurre la fractura. Cuando la separación es igual a a_0 , la fuerza de atracción interatómica es casi nula y las superficies de fractura no pueden volver a unirse. En función con este modelo, el trabajo suministrado por las cargas se convierte en energía para la creación de nuevas superficies de fractura (González, 2005).

Figura 4. Modelo de la resistencia cohesiva.



Fuente. González, J., Mecánica de Fractura, Limusa 2005, p. 33.

La variación de la resistencia del enlace en función de la separación interatómica puede expresarse como (González, 2005):

$$\sigma = \sigma^* \text{sen}(2\pi x/a_0)$$

donde σ^* es la resistencia cohesiva. Si x es muy pequeño, la siguiente aproximación se valida:

$$\sigma = \sigma^*(2\pi x/a_0)$$

Si se asume que la separación produce una deformación elástica ε , el esfuerzo aplicado puede calcularse de acuerdo a la Ley de Hooke, como $\sigma = \varepsilon E$, la deformación en la dirección x es igual a x/a_0 , igualando esfuerzos con la ecuación anterior:

$$\sigma^*(2\pi x/a_0) = E(x/a_0)$$

Por lo tanto la resistencia cohesiva sería igual a:

$$\sigma^* = E/2\pi$$

Al sustituir valores típicos de E , notamos que la resistencia cohesiva es mucho mayor que el esfuerzo de fractura medido experimentalmente, por lo que se ha concluido que la fractura debe estar influenciada por defectos en los materiales.

1.8.2 Teoría de la fractura de Inglis.

Inglis consideró la teoría de ruptura y propuso una teoría basada en la concentración de esfuerzo en la punta de las grietas. Consideró una cavidad elíptica con un eje mayor a y un eje menor b en un sólido continuo sometido a un esfuerzo externo de tensión. En la punta o borde de la cavidad, un campo de esfuerzo de tensión está presente, este esfuerzo será mayor que la fuerza externa aplicada, mientras que en el área relativamente plana de la grieta se dan esfuerzos de compresión. La fractura y su expansión tendrán lugar cuando el esfuerzo en la punta de la grieta sea el suficiente para romper los enlaces interatómicos presentes justo al frente del fin de la grieta (Basu, 2011).

La presencia de defectos fue analizada por Inglis utilizando el siguiente procedimiento: en una placa de dimensiones infinitas con un hueco elíptico en su centro, de longitud $2c$ y radio en la punta igual a r , el esfuerzo máximo en la punta del hueco está dado por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma [1 + 2(c/r)^{1/2}]$$

donde σ es el esfuerzo aplicado. Si el radio de la punta tiende a cero:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2\sigma(c/r)^{1/2}$$

Este razonamiento dio origen a la Mecánica de la Fractura, al notar que al sustituir las dimensiones de los defectos con datos cercanos a espacios interatómicos, los esfuerzos resistentes alcanzaban valores cercanos a las resistencias cohesivas.

1.8.3 Teoría de la fractura de Griffith

La teoría más aceptada de fractura en los sólidos frágiles fue enunciada por Griffith y se basa en consideraciones energéticas, específicamente en la conservación de la energía. Postula que la energía interna de un sólido sometido a un esfuerzo se compone de la suma de la energía de deformación elástica almacenada y la energía de la superficie de la grieta.

Para que la grieta pueda incrementarse será necesario un incremento en la energía del sistema, que puede provenir del interior del cuerpo, de trabajo mecánico exterior o interior, o del flujo de calor. Si no se da el incremento necesario de energía la grieta no se propagará. Sin embargo si se produce energía por trabajo mecánico exterior, o hay un cambio en la energía elástica almacenada y el sistema sale de balance, la grieta se propagará (Basu, 2011).

Griffith derivó una expresión para determinar el esfuerzo de fractura en materiales frágiles. Partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena una energía potencial y propuso que esta energía elástica almacenada es la fuerza que impulsa el crecimiento de grietas, siempre que la demanda de energía para la extensión de la grieta sea satisfecha por la conversión de energía elástica almacenada. Griffith propuso que la energía elástica se transforma en energía de superficie de fractura, haciendo crecer la grieta (González, 2005).

Se desarrolló el siguiente procedimiento: para una placa con una grieta central que es deformada elásticamente, la energía potencial almacenada es:

$$U = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E}$$

donde σ es el esfuerzo en la placa, a es el tamaño de la grieta. En un proceso de fractura completamente frágil la energía de fractura es la energía necesaria para

crear dos superficies de fractura, de modo que la energía almacenada se convierte en energía de superficie γ_s , así el cambio de energía es:

$$\Delta U = U + 4\gamma_s a$$

Al propagarse la grieta se requiere que la rapidez de conversión de energía almacenada al menos sea igual a la rapidez de creación de energía de superficie:

$$\frac{d\Delta U}{da} = 0$$

Obtenemos así la ecuación del esfuerzo de fractura de Griffith:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \varepsilon_p)}{\pi a}}$$

Una de las principales aportaciones de este razonamiento consiste en que la fractura proviene de un proceso de conversión de energía que no depende únicamente del esfuerzo, sino también del tamaño de la grieta.

1.8.4 Teoría de la fractura de Irwin y el Criterio de la Energía

Posterior a Griffith, Irwin propuso que la fractura en un sólido frágil dependerá de dos factores principales, por un lado la tasa de liberación de energía por deformación y por el otro la fuerza de resistencia a la fractura. La fractura ocurrirá cuando la tasa de liberación de energía por deformación sea menor a la fuerza de resistencia a la fractura (Barsoum, 2003).

La fractura de un cuerpo agrietado sobrevendrá cuando la rapidez de conversión de energía disponible sea mayor que un valor crítico, que es una propiedad del material. Si el cuerpo permanece deformado elásticamente durante la aplicación de la carga, éste almacenará cierta cantidad de energía potencial debido a la deformación elástica y además existirá una parte del trabajo suministrado directamente por las cargas. Irwin estableció que durante la fractura la grieta crece a expensas de esas energías y denominó este razonamiento como el criterio de la energía (González, 2005).

Si definimos F , como el trabajo suministrado por una carga, U como la energía elástica almacenada y W como la energía necesaria para extender una grieta, el balance de energía durante la extensión de una grieta se define como:

$$F - U - W = 0$$

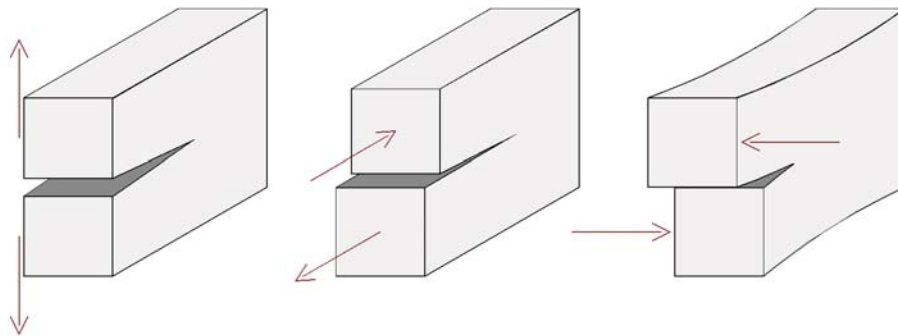
La diferencia $F - U$ es la energía que entra menos la almacenada y representa la energía disponible en el sistema para realizar un trabajo. La razón de cambio de la diferencia $F - U$ con respecto al cambio de tamaño de la grieta, representará entonces la rapidez de liberación de energía durante el agrietamiento, esto es, qué tanta energía está liberando el sistema y se transfiere como trabajo para extender la grieta.

En una grieta que se propaga bajo condiciones de carga constante la rapidez de liberación de energía aumenta a medida que crece la grieta, por lo tanto hay más energía disponible para su propagación, haciendo que la propagación sea autoacelerada. De manera inversa, en condiciones de desplazamiento constante la grieta crece hasta una determinada longitud y se detiene (González, 2005).

1.8.5 Tipos clásicos de fractura

La teoría clásica de fractura mecánica establece tres modos diferentes de falla en sólidos. El Modo I, denominado de apertura o tensión, es considerado el más peligroso de todos y regularmente las cerámicas fallan de esta manera. El Modo II, es conocido como cizalla o cortante, y al Modo III se le denomina de desgarre o deslizamiento. En la Figura 5, podemos observar gráficamente los modos de fractura.

Figura 5. Modos de fractura, de izquierda a derecha, I, II, III.



1.9 Porosidad y tamaño de grano en las cerámicas

La porosidad reduce la resistencia en las cerámicas debido a que reducen el área transversal que resistirá el trabajo mecánico, además se ha expuesto anteriormente que los poros actúan como concentradores del esfuerzo. Se ha observado en repetidas ocasiones que aquellas cerámicas con tamaños de grano más finos tienden a tener una mayor resistencia a la fractura que aquellas con granos más gruesos.

Las siguientes son las principales conclusiones respecto a este tema documentadas (Wachtman, 2009):

- 1) El tamaño de las grietas decrecerá al disminuir el tamaño de grano;

- 2) En policristales no cúbicos la expansión térmica anisotrópica y la elasticidad anisotrópica pueden provocar un incremento en la tasa de liberación de energía de deformación, lo que provocara microfisuras;
- 3) Los granos más finos tiene menos impurezas en sus límites, lo que se traduce en mayor dureza.

1.10 Mecanismos de refuerzo en materiales cerámicos

El diseño y la producción de microestructuras cerámicas que incrementen la resistencia a la fractura es un tema de gran interés y objetivo principal de muchas investigaciones actuales. El factor esencial en el diseño de mecanismos de fortalecimiento en cerámicas consiste en incrementar la cantidad de energía necesaria para que la grieta se propague, dicho de otra manera, el objetivo principal consiste en que la microestructura sea capaz de absorber una mayor cantidad de energía de la punta de la grieta para así evitar su propagación.

1.10.1 Refuerzo por desviación de la grieta (crack deflection)

La grieta puede desviarse por medio de la geometría de los granos o mediante la introducción de partículas de geometría distinta, Figura 6. La desviación de la grieta puede tener lugar donde se encuentren áreas con una resistencia menor a la propagación de la grieta, por ejemplo en los límites de los granos, donde se requiere aproximadamente la mitad de la energía de fractura presente en un cristal sencillo. Por lo tanto una grieta avanzando por una cerámica policristalina pretenderá hacerlo a lo largo de los límites de grano (Barsoum, 2003), esto es conocido como agrietamiento transgranular³.

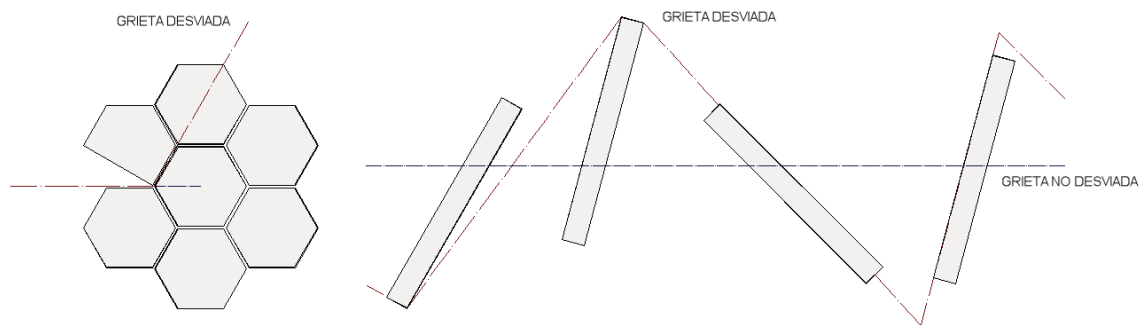
Las siguientes son las conclusiones del estudio de Faber y Evans (Wachtman, 2009) sobre los resultados de desviación de grietas utilizando partículas en forma de esfera, barra y disco en un cuerpo uniforme:

- 1) El mecanismo de desviación depende de la forma de la partícula y la dosificación;

³ Cuando la grieta avanza a través de los granos, se le denomina intergranular.

- 2) Independientemente del tamaño de la partícula de refuerzo, la morfología más eficiente para la desviación es la barra, seguida por el disco y finalmente la esfera;
- 3) La resistencia incrementa aumentando la cantidad de partículas hasta una proporción de 20%, en adelante no hay un incremento significativo.

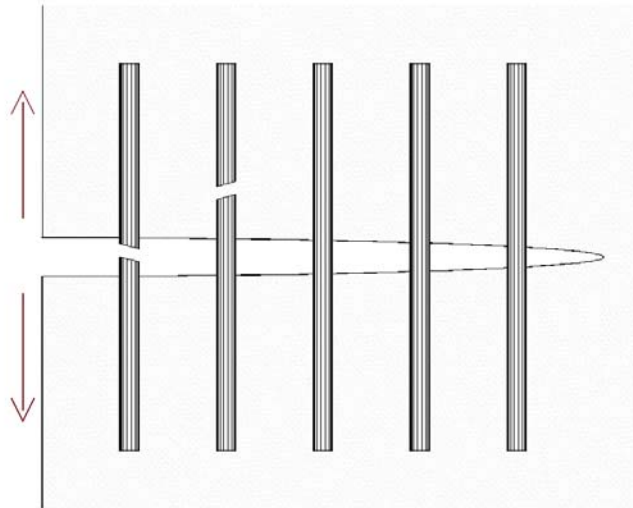
Figura 6. Refuerzo por desviación de la grieta.



1.10.2 Refuerzo por puenteo de la grieta (crack bridging)

El refuerzo por puenteo es considerado un mecanismo más efectivo que la desviación. El incremento en la resistencia resulta del puenteo de la superficie de la grieta detrás de su punta mediante la introducción de un fuerte fase de refuerzo, Figura 7. Los ligamentos pueden ser fibras, whiskers, metales dúctiles o granos alargados. Un aspecto esencial en el mecanismo de puenteo es denominado "pullout", indica que una vez que la fase de refuerzo ha fallado en un plano distinto al eje de la grieta, esta continuará consumiendo energía de fractura. Este mecanismo de refuerzo es de gran interés ya que diseñado correctamente evitará la falla abrupta y catastrófica común en las cerámicas, generando la posibilidad de nuevas aplicaciones en los materiales cerámicos y un uso más seguro.

Figura 7. Refuerzo por puenteo de la grieta.



1.11 Compuestos cerámicos reforzados

Para lograr combinar las propiedades más favorables de dos o más clases de materiales (cerámicos, metálicos, poliméricos), se ha desarrollado una nueva clase de materiales denominada "compuestos" o "composites". Los materiales compuestos pueden definirse como aquellos que enlazan en su microestructura dos o más fases, buscando proveer propiedades adaptadas a aplicaciones específicas (Basu, 2011). Dichas propiedades pueden ser el incremento de la dureza, de la resistencia, de la elasticidad, etc. Un ejemplo de materiales compuestos y de gran interés, son los compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras, donde se ha logrado transformar el comportamiento frágil de las cerámicas en un comportamiento dúctil, Figura 8.

Figura 8. Esquema del comportamiento de las cerámicas reforzadas.



Fuente. Basu, B., Esquema: Advanced Structural Ceramics, Wiley 2011, p. 62.

1.11.1 Fibras

Las fibras son formas finas y largas de materia, con diámetros del orden desde los 10 μm ., y una longitud que puede ir de algunos milímetros hasta ser virtualmente continua. Generalmente poseen propiedades muy superiores a las que posee el material del que proceden en cuando se encuentra en una forma masiva. En los compuestos de matriz cerámica, solamente se utilizan aquellas fibras que puedan soportar las altas temperaturas de producción de las cerámicas sin sufrir daños significativos.

Es recomendable que las fibras utilizadas cumplan también los siguientes requisitos: estabilidad de largo tiempo a altas temperaturas, resistencia a la oxidación y resistencia a la fluencia. La morfología de la fibra determina las propiedades a un nivel macroscópico. Algunos criterios importantes son: la

sección transversal, la uniformidad del diámetro a lo largo de la fibra, la porosidad, los defectos estructurales, las propiedades de la superficie como la dureza, y la energía superficial. La adhesión a la matriz del compuesto esta fuertemente influenciada por las características antes mencionadas.

1.11.1.1 Fibras vegetales

Podemos clasificar las fibras vegetales en dos grandes grupos: fibras de madera y fibras de otra procedencia. Las fibras de líber como el yute, el cáñamo, o el lino, son las más adecuadas para mejorar la resistencia a la tensión y a la flexión de los materiales compuestos. Las fibras más gruesas como el sisal o el coco son mejores para incrementar la dureza (Biagiotti, 2008). Las principales ventajas de utilizar fibras naturales en materiales compuestos, comparadas con las fibras sintéticas pueden resumirse en los siguientes puntos: son biodegradables, su peso específico es bajo, su fuerza específica es alta, provienen de recursos renovables, su producción tiene bajos costos, su procesamiento es saludable, y tienen buenas propiedades térmicas y acústicas. Las principales desventajas o inconvenientes en su uso pueden ser las siguientes: su calidad es variable (influenciada por diversos factores, como el clima), tienden a absorber humedad, su temperatura de procesamiento es limitada, tienen poca durabilidad, y una pobre resistencia al fuego.

Estructura física y química

Las fibras vegetales son un conjunto de largas, delgadas y puntiagudas celdas, constituidas de muros celulares al exterior y aire al interior. Cada muro celular consta de cuatro capas, una capa primaria al exterior y tres capas secundarias al interior. La cantidad de hemicelulosa contenida en cada capa es casi la misma, lo que permite la expansión y contracción conjunta entre las capas cuando se presentan cambios de humedad. Existen una cantidad importante de perforaciones equitativamente separadas a lo largo de la fibra, estas permiten el intercambio de agua y aire entre las células y entre el interior y el exterior de la fibra (Biagiotti, 2008).

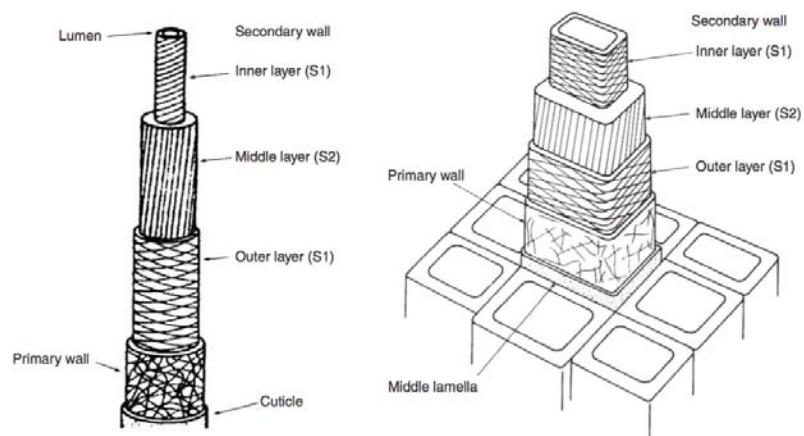
Propiedades térmicas de las fibras naturales

Las principales propiedades de las fibras vegetales relacionadas con la producción de materiales compuestos son la expansión térmica y la degradación térmica. Análisis gravimétricos han demostrado que a partir de 200°C se da una pérdida considerable de masa en las fibras naturales y a partir de esta temperatura la degradación irreversible ocurre (Biagiotti, 2008). Esta característica constituye el mayor impedimento en el uso de las fibras naturales. Es posible mejorar la estabilidad térmica de las fibras con diversos tratamientos químicos y físicos.

Absorción de humedad

Las fibras naturales son susceptibles a la absorción de humedad. Por lo tanto los compuestos reforzados con fibras naturales pueden absorber una gran cantidad de agua, disminuyendo así su propiedades mecánicas. La humedad absorbida plastificará la matriz del compuesto y puede producir agrietamientos microestructurales derivados de la hinchazón de las fibras (Biagiotti, 2008).

Figura 9. Estructura morfológica de fibras de algodón y de madera de abeto.



Fuente. Biagiotti, J. A Review on Natural Fiber Composites. Taylor and Francys, p. 48.

1.11.1.2 Fibras Metálicas

Como clase los materiales metálicos se distinguen por diversas de sus propiedades, como su conductividad térmica y eléctrica, su ductilidad, y el brillo de sus superficies. Altos valores de ductilidad y de resistencia a la tensión pueden lograrse mediante las aleaciones. Las aleaciones de hierro, aluminio, cobre, níquel y titanio, son las de mayor interés técnico. Es importante mencionar que el metal conformado en fibras posee altos grados de resistencia, a la vez que se comporta de manera consistente. Los siguientes son los metales no ferrosos comúnmente utilizados en la producción de fibras comerciales.

Cobre. Las propiedades físicas más importantes del cobre son su excelente conductividad térmica y eléctrica. La conductividad del 100% puede lograrse con un grado de alta pureza de cobre sin oxígeno. Conforme incrementa la temperatura la conductividad térmica del cobre incrementa también. El cobre tiene además un alto coeficiente de expansión térmica, es inherentemente resistente a la corrosión. Es noble con el hidrógeno y termodinámicamente estable sin tendencia a la corrosión en agua y ácidos no-oxigenados. La mayoría de los productos corrosivos formados en el cobre y las aleaciones de cobre producen la adherencia de una capa relativamente impermeable con baja solubilidad que provee la protección a la corrosión.

El cobre es comúnmente utilizado en el manejo de agua dulce y salada. Aguas fluyendo a alta velocidad que contengan ácido carbónico o ácidos orgánicos pueden destruir la película de óxido y acelerar el proceso de corrosión del cobre. El amoníaco húmedo, el hidróxido de amoníaco, las sales alcalinas (carbonato de sodio, fosfato de sodio o silicato de sodio) son altamente corrosivos para el cobre. El cobre puro es inmune a las fallas por estrés producto de la corrosión. Las aleaciones de cobre son atractivas para aplicaciones en las que se requiere una combinación de cualidades eléctricas, mecánicas, no magnéticas, de resistencia a la corrosión, de conductividad térmica y de resistencia al desgaste.

Aluminio. El aluminio como un metal estructural tiene las ventajas de bajo peso, resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y apariencia. El aluminio posee una elevada resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes,

hacia el agua, químicos y otros materiales. Sus sales no son tóxicas (lo que permite que tenga aplicaciones en la industria alimenticia y farmacéutica), ni dañinas al medio ambiente. El aluminio tienen también altos grados de conductividad térmica y eléctrica, alta reflectividad y no es un material magnético (Schweitzer, 2003). Las propiedades que favorecen la selección del aluminio y sus aleaciones son su alta relación resistencia peso, resistencia a la corrosión de muchos productos químicos, alta conductividad térmica y eléctrica, a-toxicidad, reflectividad, apariencia, formabilidad y maquinabilidad.

Zinc. Las propiedades mecánicas del zinc son relativamente pobres, se le considera un metal débil. Su uso más extendido se da en recubrimientos, que garantizan un uso más eficiente que el acero y la conservación de la energía (galvanizado, electro galvanizado). Los recubrimientos de zinc protegen el sustrato por medio del control catódico. El zinc se utiliza en aleaciones súper plásticas que tienen buenas características de formabilidad por su capacidad de sufrir grandes deformaciones sin fallar.

Titanio. El titanio y sus aleaciones son conocidas por su excelente relación resistencia peso y por su alta resistencia a la corrosión. Su módulo de gravedad específica es aproximadamente 60% menor que el del acero y tiene además una alta capacidad de resistencia a la tensión. El peso de las aleaciones el titano representa el 60% del peso del acero, su resistencia a la corrosión es superior que la del aluminio y del acero inoxidable. El titanio tiene además una baja permeabilidad magnética. El titanio tiene también un bajo coeficiente de expansión térmica y una alta resistencia a la electricidad, además de una excepcional resistencia a la corrosión de las aguas salinas. Aunque es costoso su alta relación resistencia peso y su resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas lo hace atractivo para varias aplicaciones.

Magnesio. En relación resistencia peso, las aleaciones de magnesio compiten con las aleaciones de aluminio, sin embargo el magnesio tiene una densidad 36% menor que el aluminio. El magnesio tiene también conductividad térmica y eléctrica elevada, alta resistencia al impacto, buena capacidad de amortiguación y baja inercia. Las aleaciones de alta pureza de magnesio pueden

ofrecer una mejor resistencia a la corrosión que el aluminio o el acero. El magnesio es el metal de ingeniería más ligero que existe y tiene una buena capacidad de amortiguamiento a las vibraciones. Sus aleaciones se aplican en cualquier lugar donde el peso es de suma importancia.

1.11.2 Relación fibra matriz

Debido a que durante la producción de los compuestos cerámicos generalmente se utilizan altas temperaturas, la interacción y estabilidad entre la matriz y la fase de refuerzo son una preocupación. En el caso que sea necesario el recubrimiento o tratamiento de la fibra, su interacción y estabilidad con la matriz deberá también ser considerado.

Los siguientes son los puntos más importantes a considerar para la correcta integración de la matriz cerámica y la fase de refuerzo, la compatibilidad debe ser analizada desde la integración del compuesto hasta su puesta en funciones (Belitskus, 1993):

- 1.-** Puntos de fusión, degradación o descomposición.
- 2.-** Volatilidad.
- 3.-** Oxidación y reducción.
- 4.-** Reacciones químicas entre la matriz y la fase de refuerzo.
- 5.-** Propiedades mecánicas.
- 6.-** Coeficientes de expansión térmica.

Las características mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras están estrechamente relacionadas con las características de la matriz y de la fase de refuerzo, así como del grado en que el esfuerzo es transmitido de la

fase de refuerzo a través de la matriz. Se requiere una longitud crítica de fibra para observar un aumento significativo en la resistencia del material, la longitud crítica se obtiene a partir de relacionar la resistencia a tensión de la fibra σf^* , el diámetro de la fibra d , la resistencia a cortante de la matriz τ_c , y se expresa como (Callister, 2012):

$$l_c = \sigma f^* d / 2\tau_c.$$

A medida que la longitud de la fibra incrementa el refuerzo se vuelve más efectivo.

1.11.3 Arquitectura del refuerzo y compuestos laminados

En las cerámicas reforzadas con fibras continuas el ordenamiento de las fibras o *arquitectura de las fibras* provee el refuerzo estructural al compuesto. Mediante un adecuado diseño de la geometría de las fibras el desempeño estructural del compuesto cerámico puede ser alterado para satisfacer las necesidades de diseño. La arquitectura de las fibras puede ir desde un arreglo en torno a un solo eje, hasta un diseño tridimensional más complejo.

Es evidente que en un compuesto donde el refuerzo se alinee de manera unidireccional la propagación de las grietas en un eje paralelo a la dirección de las fibras no experimentara el refuerzo o puenteo que si se dará en una grieta que avance de manera perpendicular al arreglo de refuerzo (Belitskus, 1993). Para incrementar los beneficios de refuerzo en más de un eje es necesario llevar a cabo un arreglo tridimensional de la fase de refuerzo o desarrollar una estructura laminar donde se alterne la dirección de las fibras en las láminas sucesivas.

Tipos de arquitectura de refuerzo

A continuación se enumeran los tipos conocidos de arquitectura de refuerzo en materiales compuestos:

1) Unidireccional. Las fibras se alinean en una sola dirección. El resultado de esta orientación será un refuerzo unidireccional, donde las características del compuesto serán anisotrópicas (direccionales). La resistencia y la dureza mejoraran solamente en la dirección de la alineación de las fibras.

2) Cross-plyed. El arreglo se dará en dos o más direcciones. Por ejemplo 0° - 45° - 90° - 45° - 0° . Las propiedades mecánicas se verán reducidas, sin embargo serán las mismas en todo el compuesto.

3) Cloth reinforcement. Provee un refuerzo multidireccional dentro de un solo plano, la técnica de tejido de las fibras se ha adaptado de la manufactura textil. El tejido puede ser biaxial, triaxial, etc.

4) Tridimensional. Este método de alineación resuelve el problema de la relación de refuerzo entre plano o láminas, el término tridimensional se utilizará para incluir cualquier arreglo en donde las fibras sean orientadas en por lo menos tres direcciones ortogonales.

5) Whiskers. Los whiskers estarán más bien orientados de manera aleatoria. Puede lograrse una orientación parcial dependiendo el método de fabricación del compuesto.

1.11.4 Regla de las mezclas en materiales compuestos

Cuando se consigue atener los siguientes criterios en la fabricación de un material compuesto reforzado con fibras (Callister, 2012):

- 1) Una longitud de fibra 15 veces mayor a la longitud crítica calculada;
- 2) Una orientación preferente en la dirección del esfuerzo por aplicarse;
- 3) Volumen crítico de refuerzo donde las propiedades del compuesto son mejores que las de la matriz de manera individual;

podemos aplicar la Regla de las Mezclas para determinar de manera teórica las propiedades y el comportamiento del material, tenemos así que:

a) La Resistencia del Compuesto σ_c , será una suma de las resistencias individuales de los componentes matriz m y fibra f en función de su cantidad o volumen V :

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

b) El Módulo de Elasticidad del Compuesto E_c , será una suma de los Módulos individuales de los componentes matriz m y fibra f en función de su cantidad o volumen V :

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f$$

c) La Deformación del Compuesto ε_c , será igual a la deformación de la matriz ε_m y la deformación de la fibra ε_f se logra un estado de isodeformación:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

Conclusiones del capítulo

I) Las propiedades mecánicas de las cerámicas dependen del arreglo de su estructura atómica y de las propiedades de su microestructura. El proceso de sinterización es el responsable de la densidad y estabilidad química de los materiales cerámicos.

II) Una de las mayores limitaciones de las cerámicas estructurales es su pobre resistencia a la fractura.

III) La falta de ductilidad a temperatura ambiente y la inestabilidad en la fractura de los materiales cerámicos ha motivado un continuo esfuerzo por lograr nuevos diseños de microestructura que permitan optimizar estas propiedades.

IV) Bajo esfuerzos de tensión la falla en materiales cerámicos será de manera repentina, total y catastrófica, y la resistencia presentara importantes variaciones.

V) El agrietamiento en las cerámicas se propaga de manera rápida, auto acelerada e imposible de detener, este agrietamiento es considerado inestable.

VI) El factor esencial en el diseño de mecanismos de fortalecimiento en cerámicas consiste en incrementar la cantidad de energía necesaria para la propagación de grietas.

VII) El refuerzo por puenteo o crack bridging es considerado el mecanismo más efectivo de optimización mecánica.

VIII) Los materiales compuestos combinan dos o más clases de materiales para proveer prestaciones específicas o superiores en los materiales.

IX) Los materiales metálicos se distinguen entre otras cosas por ser dúctiles y conformados en fibras poseen altos grados de resistencia y un comportamiento consistente.

X) Para integrar un material compuesto es necesario que se den condiciones de compatibilidad entre las fases en aspectos de producción, proceso y vida útil.

XI) Se requiere una longitud crítica de fibra para observar un cambio significativo en las propiedades de un material compuesto.

XII) Si se logran condiciones de orientación preferente, longitud crítica, y dosificación, la resistencia, el Módulo de Elasticidad y la deformación del material compuesto incrementara.

2. Cerámicas utilizadas en elementos estructurales

Una vez comprendidas las fortalezas y debilidades de los materiales cerámicos, la influencia de la naturaleza cristalina, las propiedades microestructurales y la presencia de imperfecciones en las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos, se hace necesario conocer como se traducen estas limitaciones en los aspectos operativos del material. Así como las condiciones de uso a las que están sometidos los elementos estructurales que las incorporan. Esto con la finalidad de determinar el alcance de una potencial optimización del comportamiento del material. Partimos de definir que clase de materia prima integra las piezas estructurales cerámicas.

2.1 Arcillas utilizadas en la industria de la construcción

Desde una perspectiva geológica las arcillas se componen de rocas sedimentarias en forma de granos finos y suaves, producto de la intemperización de feldespatos (como ortoclasas y plagioclasas) y silicatos ferromagnéticos (como micas y anfíboles), contenidos en rocas ígneas y metamórficas. Regularmente las arcillas se componen de varios aluminosilicatos hidratados, principalmente caolinita, illita y montmorillonita.

La arcilla es quizá uno de los materiales más complejos utilizados en la industria, por lo tanto, puede llegar a ser muy difícil controlarlas durante su procesamiento. El termino arcilla es utilizado generalmente para referirse a un grupo de minerales compuesto de rocas sedimentarias, con un tamaño de grano menor a los 2 μ m. Las arcillas son aluminosilicatos hidratados que como característica general son finos y plásticos (Cardarelli, 2008).

2.1.1 Sinterización de las arcillas

Cuando la arcilla se somete a un tratamiento térmico o sinterización (Gueto, 2005):

- 1.- Entre los 100°C y 200°C se pierde la humedad residual que contiene la arcilla (aun después de seca), particularmente el agua alojada entre los planos moleculares (agua interlamilar).
- 2.- De 350°C a 700°C la sustancia orgánica se quema y se volatiliza. Sobreviene la eliminación del agua de combinación y se descompone la arcilla en metacaolín o caolín deshidratado (compuesto muy inestable).
- 3.- De 700° a 900°C el producto de la deshidratación, el metacaolín, tiende a desprender alúmina y libera sílice.
- 4.- De 900°C a 1,000°C ocurren dos reacciones químicas importantes, la alúmina γ se transforma en alúmina α y se combinan alúmina y sílice, dando lugar a alguno de los tres aluminosilicatos polimorfos: sillimanita (muy estable), andalucita, distena (menos estable).
- 5.- A partir de 1595°C, el mineral altamente refractario mullita se forma, de gran dureza y pequeño coeficiente de dilatación.
- 6.- La fusión de la arcilla se da alrededor de 1,780°C.

La calidad y características de los productos de mampostería constituidos con arcillas sinterizadas esta directamente determinada por las características de las materias primas que los integran y los métodos de manufactura utilizados en su producción.

Las arcillas pueden ser clasificadas como calcáreas y no calcáreas. Ambas se conforman por aluminosilicatos, sin embargo las arcillas calcáreas contienen alrededor de 15% de carbonato que produce uno color amarillizo cuando se sinterizan. Las arcillas no calcáreas son influenciadas por los feldespatos y el óxido de hierro, este último presente en un rango de entre 2% y 25% produce un color rojizo tras la cocción.

2.2 Piezas de mampostería cerámica

Según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, publicadas en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, la mampostería es *toda pieza prismática de piedra artificial, maciza o hueca o piedras naturales unidas por un mortero aglutinante.*

La norma NMX-C-404-ONNCCE-212 define una pieza de mampostería como un elemento prismático rectangular, que puede ser fabricado con arcilla comprimida o extruida sometida a un proceso de cocción, o por el moldeo con o sin vibrocompactación de una mezcla de agregados pétreos, cemento hidráulico u otros cementantes (pieza de concreto), o bien fabricada con otros materiales con procesos diferentes.

De igual forma, la NMX-C-404-ONNCCE-212 establece que las piezas para mampostería estructural son elementos de mampostería con las propiedades mecánicas necesarias para construir un muro con un espesor mínimo de $100mm$. Que tenga capacidad para soportar las cargas que se generan por acciones gravitacionales y accidentales (sismo, viento, etc.). Las piezas huecas deben tener celdas o perforaciones ortogonales a la cara de apoyo, ya que solo serán admitidas para uso estructural piezas con huecos verticales.

2.2.1 Tipos de piezas

La NMX-C-404-ONNCCE-212 clasifica las piezas de dos maneras, atendiendo su geometría:

1) Piezas macizas. Tienen en su sección transversal más desfavorable un área neta¹ de por lo menos 75% del área bruta², sus paredes exteriores no tienen espesores menores de $20mm$

¹ Área neta: superficie efectiva de la pieza, se obtiene de restar el área de los huecos del área total.

² Área bruta: o área total, es la resultante de multiplicar el largo por el ancho de la pieza.

2) Piezas huecas. Tienen en su sección transversal más desfavorable un área neta de por lo menos 50% del área bruta, sus paredes exteriores no tienen espesores menores de 15mm. En piezas multiperforadas el espesor de las paredes puede ir de 7 a 13mm.

Tabla 1. Características típicas de algunas piezas de mampostería.

Material	Resistencia a compresión $f_p^*(kg/cm^2)$	Coefficiente de variación C_V	Peso volumétrico (t/m^3)
Tabique rojo de barro recocido	35-115	10-30	1.30-1.50
Tabique extruido perforado verticalmente	150-430	11-25	1.65-1.96
	310-570	15-20	1.61-2.06
	150-400	11-26	1.66-2.20
Tabique extruido macizo	375-900	5-16	1.73-2.05
Tabique extruido, huecos horizontales	75-80	13-18	1.25-1.32
	50-80	16-30	1.69-1.78
Bloques de concreto: Ligero, Intermedio, Pesado	20-50		
	20-80	16-20	0.95-1.21
	70-145	7-29	1.32-1.70
		7-28	1.79-2.15
Tabicón	45-120	11-35	1.05-1.60
Silicio calcáreo	175-200	11-15	1.79

Fuente. Gallo, G. Tabla: Diseño Estructural de Casas Habitación, McGraw Hill 2011, p.12.

Como podemos observar en la tabla, las piezas de tabique de barro extruido macizo alcanzan las resistencias más altas ante esfuerzos de compresión, recordemos la influencia de la creación de sólidos densos por procesos de

extrusión y la creación de enlaces químicos de alta energía en la obtención de elevadas resistencias mecánicas.

2.3 Comportamiento de la mampostería ante esfuerzos de compresión y cortante

Hemos comentado que los materiales cerámicos presentan un excelente comportamiento ante esfuerzos de compresión y un comportamiento pobre cuando se someten a esfuerzos donde existan tensiones. Este fenómeno se ve claramente reflejado en los valores de diseño propuesto por la normatividad mexicana, como se expresa en las siguientes tablas. Se puede observar en las tablas, como la resistencia a compresión (aun cuando existe una relación entre la pieza y el mortero que los aglutina) es casi 500% superior que la resistencia al cortante.

Tabla 2. Resistencia de diseño a la compresión de la mampostería sobre área bruta.

Tipo de pieza	f_m^* , MPa (kg/cm^2)		
	Mortero I	Mortero II	Mortero III
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 6MPa, 60kg/cm^2$)	1.5 (15)	1.5 (15)	1.5 (15)
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 12MPa, 120kg/cm^2$)	4 (40)	4 (40)	4 (40)
Bloque de concreto pesado ($f_p^* \geq 10MPa, 100kg/cm^2$)	2 (20)	1.5 (15)	1.5 (15)

Fuente. Tabla: Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, México, 2004.

Tabla 3. Resistencia de diseño a cortante de la mampostería sobre área bruta.

Tipo de pieza	Vm^* , MPa (kg/cm^2)		
	Mortero I	Mortero II	Mortero III
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 6MPa, 60kg/cm^2$)	0.35 (3.5)	0.3 (3)	0.3 (3)
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 12MPa, 120kg/cm^2$)	0.3 (3)	0.2 (2)	0.2 (2)
Bloque de concreto pesado ($f_p^* \geq 10MPa, 100kg/cm^2$)	0.35 (3.5)	0.25 (2.5)	0.25 (2.5)

Fuente. Tabla: Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, México, 2004.

2.4 Resistencia de diseño a flexión en la mampostería

La determinación de resistencias de secciones de mampostería de cualquier forma sujetas a flexión, carga axial, o una combinación de ambas, se efectúa con el criterio de resistencia a flexocompresión que se especifica para concreto reforzado y con base en las hipótesis siguientes:

- a) La mampostería se comporta como un material homogéneo;
- b) La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal de un elemento es plana;
- c) **Los esfuerzos de tensión son resistidos por el acero de refuerzo únicamente;**
- d) Existe adherencia perfecta entre el acero de refuerzo vertical y el concreto o mortero de relleno que lo rodea;
- e) La sección falla cuando se alcanza en la mampostería la deformación unitaria máxima a compresión que se tomará igual a 0.003.

2.5 Análisis y diseño estructural en estructuras de mampostería

El diseño estructural consiste en el conjunto de actividades a desarrollar para determinar las características físicas de una estructura. Una obra de arquitectura debe entenderse como un sistema global, integrado por un conjunto de subsistemas que se combinan de manera precisa para cumplir adecuadamente su función. Todos los componentes de un proyecto deben interactuar de manera tal que tomen en cuenta la relación que existe entre ellos, ya sea geométrica, mecánica, estética, u otra.

2.5.1 Proceso del diseño estructural

1.- Estructuración. Se eligen materiales, se determina el peso y las propiedades mecánicas de la estructura. Se desarrolla el predimensionamiento.

2.- Análisis.

- Modelación. Se establecen las propiedades mecánicas de los materiales y las características geométricas de las secciones. Se determina un modelo teórico factible de ser analizado.
- Determinación de las acciones de diseño. Se determinan las acciones que obraran en la estructura.
- Obtención de los elementos mecánicos de diseño. Se aplican los métodos de calculo.

3.- Dimensionamiento. Se detallan según las dimensiones obtenidas los elementos estructurales.

2.5.2 Seguridad estructural

“El diseño estructural tiene como objetivo proporcionar soluciones que por medio del aprovechamiento óptimo de las propiedades de los materiales y de las técnicas de construcción den lugar a un buen comportamiento en condiciones normales de funcionamiento, con una seguridad adecuada contra la

posible ocurrencia de una falla" (Gallo, 2011). Se reconocen tres estados límites para garantizar el funcionamiento seguro de una estructura:

- a) **Estado límite.** Etapa del comportamiento a partir de la cual la respuesta de la estructura se considera inaceptable.
- b) **Estado límite de falla.** Situaciones de falla parcial o total de la estructura.
- c) **Estado límite de servicio.** Situaciones que afectan el correcto funcionamiento de la estructura, pero que no ponen en peligro la estabilidad de la construcción.

La resistencia de un elemento corresponde a la capacidad que tiene dicho elemento de evitar que una estructura sea llevada a su estado límite de falla. La resistencia es la propiedad más importante de un material, ya que esta define su capacidad de soportar fuerzas antes de llegar a la falla (se establece en términos de esfuerzo kg/cm^2 , MPa).

2.5.3 Acciones

Las acciones son sistemas de fuerzas que pueden ser: concentradas, lineales, uniformemente distribuidas, o no uniformemente distribuidas. Las acciones pueden clasificarse de manera conveniente según la duración que tienen sobre una estructura, así tenemos:

- 1.- **Acciones permanentes.** Obran en una estructura en forma continua, y su intensidad se puede considerar no variante con respecto al tiempo. Por ejemplo cargas muertas, empujes estáticos, etc.
- 2.- **Acciones variables.** Obran sobre una estructura con una intensidad variable con respecto al tiempo y alcanzan valores significativos durante periodos largos. Por ejemplo las personas, el mobiliario, el equipo, la temperatura, etc.

3.- Acciones accidentales. Son aquellas que no se deben al funcionamiento normal de una estructura, sin embargo tienen valores muy significativos durante breves periodos. Por ejemplo el sismo, el viento, las explosiones, etc. El sismo produce cada vez que el terreno cambia de dirección un efecto de "latigazo" generador de fuerzas de inercia que pueden calcularse a partir de la expresión:

$$F_S = ma$$

donde F_S es la fuerza sísmica, m la masa de la construcción y a corresponde al valor de aceleración sísmica. Esta fuerza de inercia produce efectos mecánicos en la estructura que se traducen en flexiones, cortantes y torsiones que pueden provocar la falla de una estructura. En la complejidad de este fenómeno interviene la respuesta dinámica de la estructura ante el fenómeno sísmico, sus características de rigidez, de amortiguamiento y de ductilidad.

En estructuras de mampostería, caracterizadas por ser rígidas y poco esbeltas, el principal efecto de la fuerza sísmica se traduce en cortante, siendo la flexión de menor importancia. Es importante mencionar que las excentricidades en los elementos resistentes, así como las cargas, pueden conducir a la aparición de torsiones importantes. Cuando no existen torsiones y flexiones importantes el cortante que actúa en la base de una construcción V_S puede determinarse por medio de la siguiente ecuación:

$$V_S = C_S P$$

donde $C_S = a/g =$ coeficiente sísmico (adimensional), y P es el peso de la construcción.

Los reglamentos de diseño y construcción especifican que la seguridad de una estructura debe revisarse combinando todas las acciones con una importante probabilidad de ocurrir simultáneamente en una estructura.

La determinación de las fuerzas y momentos internos en los muros debe hacerse, en general, por medio de un análisis elástico de primer orden. En la determinación de las propiedades elásticas de los muros se debe considerar que la mampostería no resiste tensiones en dirección normal a las juntas y emplear por lo tanto las propiedades de las secciones agrietadas y transformadas cuando dichas tensiones aparezcan.

2.5.4 Cargas verticales

Como sistema estructural la mampostería requiere resistir esfuerzos de compresión, flexión y cortante. Un muro o columna que se somete a esfuerzos de compresión tiende a comportarse como cualquier puntal y su capacidad de carga dependerá de la resistencia a la compresión de los materiales que componen el muro o la columna, el área transversal y las propiedades geométricas expresadas por la relación de esbeltez.

La resistencia a la compresión de un muro o columna dependerá también de la resistencia de los elementos (unidades como bloques o tabiques) y el mortero que los aglutina. El valor de la resistencia combinada de estos elementos se vera también afectado por el control de calidad ejercido durante su producción y ejecución. En cambio, la relación de esbeltez depende únicamente de la altura/longitud efectiva y el espesor efectivo de un elemento.

2.5.5 Análisis por cargas verticales

Para el análisis por cargas verticales se toma en cuenta que en las juntas de los muros y los elementos de piso ocurren rotaciones locales debidas al aplastamiento del mortero. Para muros que soportan losas de concreto

monolíticas o prefabricadas, se supone que la junta tiene suficiente capacidad de rotación para que pueda considerarse que para efectos de distribución de momentos en el nudo muro-losa la rigidez a flexión fuera de los planos de los muros es nula y que los muros sólo quedan cargados axialmente.

2.5.6 Relación de esbeltez

Los muros y columnas de mampostería sometidos a esfuerzos de compresión tienen tendencia al pandeo en la misma manera que el concreto, el acero, o la madera. Por lo tanto es sumamente importante determinar correctamente la relación de esbeltez de los elementos para garantizar que no se presente una falla por pandeo antes que por compresión. La relación de esbeltez se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{altura efectiva}}{\text{grosor efectivo}} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{longitud efectiva}}{\text{grosor efectivo}}$$

A mayor relación de esbeltez mayor es la tendencia de un elemento a fallar por pandeo y por lo tanto menor es su capacidad de carga.

2.5.7 Carga excéntrica

Cuando se analiza un elemento estructural sometido a esfuerzos de compresión nos damos cuenta que difícilmente dicho esfuerzo o carga estará ubicado de manera perfectamente concéntrica en el elemento. Por lo tanto se considera que la carga está aplicada a una distancia determinada del centroide del elemento, denominada excentricidad. La excentricidad acentuará la tendencia de un elemento estructural a fallar por pandeo, por lo tanto dicho elemento debe ser diseñado para resistir los esfuerzos adicionales que esta situación genera.

Los muros sometidos a momentos flexionantes, perpendiculares a su plano podrán ser combinados o bien reforzados interiormente. En este último caso podrá determinarse la resistencia a flexocompresión tomando en cuenta el refuerzo vertical del muro cuando la separación de éste no exceda de seis veces el espesor de la mampostería del muro, t .

2.5.8 Cargas laterales

Cuando un elemento de mampostería soporta cargas laterales y se curva, el esfuerzo en un área particular de la sección transversal puede variar de ser de compresión en una cara a un esfuerzo de tensión en otra cara. El resultado de este comportamiento es denominado esfuerzo de flexión. Si el esfuerzo de tensión excede la resistencia del material, la sección fallará.

La mampostería es considerada un material frágil, por lo tanto su resistencia a la tensión es baja y esta dependerá del tipo de pieza empleado, del tipo de mortero y de forma más importante de la unión entre estos dos elementos. Bajo experimentación en laboratorio se ha determinado que hay una estrecha relación entre la absorción de la pieza y la resistencia a la tensión del sistema (Curtin, 2006). La mampostería se comporta como un material anisotrópico, por lo tanto presentara distintos valores de resistencia en distintas direcciones.

Se acepta el análisis mediante métodos dinámicos o estáticos que cumplan las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo. La determinación de los efectos de las cargas laterales inducidas por sismo se hace con base en las rigideces relativas de los distintos muros y segmentos de muro. Estas se determinan tomando en cuenta las deformaciones por cortante y por flexión. Para evaluar las deformaciones por flexión se considerará la sección agrietada del muro o segmento cuando la relación de carga vertical a momento flexionante es tal que se presenten tensiones verticales. Se toma en cuenta la restricción que impone a la rotación de los muros, la rigidez de los sistemas de piso y techo, así como la de los dinteles y pretiles.

2.6 Forma de las unidades que componen la mampostería

Ha podido demostrarse experimentalmente (Gallo, 2011) que mientras más grandes sean las piezas que componen un muro o columna en consideración, mayor es el valor de resistencia resultante. Esto puede entenderse considerando que la junta de mortero, en la mampostería correctamente diseñada, constituye el elemento más débil del sistema constructivo y mientras más grandes las unidades menor la cantidad de juntas por unidad de medida.

2.7 Importancia del grosor de las juntas

La función más importante de las juntas de mortero en la mampostería consiste en proveer una base para que las piezas puedan transmitir correctamente los esfuerzos de compresión. La junta de mortero debe ser el elemento más débil del sistema de mampostería. Estudios realizados demuestran que la mampostería tiene mayores valores de resistencia a medida que se disminuye el espesor de la junta de mortero y se aumenta la resistencia del mortero de junteo (Parral, 2007).

2.8 Calidad de la mano de obra

Este aspecto es quizá el más importante de todos los involucrados en la ejecución de sistemas de mampostería. El control de calidad en las piezas puede fácilmente lograrse en las plantas de producción, sin embargo en el sitio de ejecución puede ser un poco más complejo. Una mala calidad de ejecución puede invalidar todos los aspectos bien logrados en el diseño y en la producción de las piezas.

2.9 Piezas industriales de arcilla extruida

Como parte del desarrollo de la investigación se realizó una visita a la planta de producción de piezas de cerámica estructural de Novaceramic, ubicada en el Estado de Tlaxcala. Se seleccionó esta planta debido a los siguientes aspectos:

Diseño de compuesto de matriz cerámica reforzado con fibras con capacidad energética estructural
Arq. César Alejandro Ventura Ruiz Esparza

Su capacidad instalada. Alrededor de 1 millón de piezas se producen diariamente;

Tecnología de punta. La planta esta automatizada casi en su totalidad y utiliza hornos túnel de alta tecnología, así como procesos de cogeneración energética;

Calidad de producción. Sus piezas de cerámica cumplen con las Normas Mexicanas NMX, referentes a mecánica, resistencia y eficiencia energética.

De especial interés resultó el conocimiento sobre el proceso de producción de Novaceramic desde el punto de vista del manejo del material (arcillas) y su control durante la fabricación de piezas. El proceso de producción se resume a continuación:

1.- Obtención de la materia prima. La planta explota las tierras del estado de Tlaxcala en el marco de un convenio de colaboración con ejidatarios y propietarios. Actualmente cuentan con un banco de material que garantiza la producción de 20 años. La materia prima como se ha discutido anteriormente consiste en material arcilloso.

2.- Molienda. El material de banco es triturado hasta un tamaño de partícula menor a $3mm.$, comentan los ingenieros de planta que han determinado que con esta dimensión de grano pueden obtener una excelente adherencia pieza-mortero.

3.- Mezclado. Una vez obtenida la granulometría deseada, la pasta se humedece con vapor de agua hasta que se obtiene un contenido de humedad cercano al 20%. La pasta se amasa hasta obtener una consistencia homogénea y libre de aire.

Figura 10. Banco de materia prima.



Figura 11. Trituradora mecánica.



4.- Extrusión. En este paso se moldean las piezas según la forma deseada mediante extrusión, donde se aplica una presión de salida de $25\text{kg}/\text{cm}^2$. Esta etapa es de fundamental importancia en la obtención de la resistencia mecánica de las piezas ya que en conjunto con el sinterizado, garantiza la obtención de sólidos densos y poco porosos.

Figura 12. Pieza de barro con alto contenido de humedad.



Figura 13. Extrusora mecánica.



5.- Estibado y secado. Aprovechando el calor producido por el horno utilizado en el proceso de sinterización, las piezas se estiban y se secan dentro de una cámara de temperatura controlada. La temperatura de secado asciende gradualmente desde 25°C hasta 90°C. Este proceso se mantiene durante 18 horas y las piezas pasan de tener un contenido de humedad del 20% a entre 1 – 2%.

Figura 14. Piezas de cerámica secas sin sinterizar estibadas.



6.- Sinterizado. Punto crítico del proceso, el buen sinterizado garantiza la calidad, estabilidad y resistencia de las piezas. En este caso se someten las piezas a un proceso gradual que va desde los 90°C hasta los 900°C y enfriamiento paulatino. El proceso de sinterizado tiene una duración aproximada de 15 horas y se utiliza tecnología de horno túnel, siendo este uno de los sistemas más avanzados y eficientes de la industria cerámica.

7.- Paletizado³. Una vez frías las piezas, estas se empaquetan de manera automatizada en palets de 1m^3 . La dimensión del palet se da en función de la capacidad de la maquinaria, no del proceso constructivo.

³ Empaquetamiento.

Figura 15. Inyectores de gas del horno túnel.



Figura 16. Proceso de empaquetamiento automatizado.



Conclusiones del capítulo

I) Las arcillas o aluminosilicatos hidratados constituyen el principal componente en la producción de piezas cerámicas estructurales, donde el proceso de extrusión y sinterizado garantizan altos valores de resistencia ante esfuerzos de compresión.

II) Según la Norma Mexicana, los materiales que integran las piezas de mampostería deben tener capacidad de soportar acciones accidentales. Este enunciado es ambiguo e incompleto, ya que únicamente se fijan rangos de comportamiento para soportar esfuerzos de compresión.

III) El pobre desempeño mecánico de los materiales cerámicos ante esfuerzos donde existan tensiones se ve reflejado en los valores de diseño propuestos por las Normas Mexicanas, donde se confirma la relación 1:10 respecto a la capacidad compresión-tensión.

IV) Existen esfuerzos de compresión, cortante, flexión, tensión y torsión en los tableros de mampostería, donde toda tensión presente es resistida por el acero de refuerzo incorporado.

V) Lograr una mejora en la resistencia y comportamiento ante esfuerzos de tensión en las piezas de mampostería se verá reflejado en una mayor capacidad de los tableros a tomar esfuerzos donde existan tensiones, como flexión o cortante, ya sea que se produzcan por excentricidades o cargas accidentales.

VI) Un incremento en la resistencia y estabilización del comportamiento ante esfuerzos de tensión en las piezas de mampostería, reflejarían un decremento

en la cantidad de acero necesario para hacer frente a los esfuerzos donde existan tensiones.

3.0 Propuesta y método experimental

Para optimizar el comportamiento mecánico de las piezas cerámicas de mampostería la conclusión más importante consiste en que como todo componente estructural los elementos de mampostería están sujetos a diversas clases de esfuerzos, como compresión, flexión, cortante, tensión y torsión. Sin embargo los materiales cerámicos no presentan un comportamiento deseable, en cuestión de resistencia y fractura, al ser sometidos a esfuerzos donde existan tensiones.

Por lo tanto, la propuesta de experimentación tiene como objetivo la integración y caracterización mecánica de un material compuesto, constituido de una matriz cerámica reforzado por fibras que logren mejorar las propiedades limitantes de las cerámicas. Dichas propiedades limitantes son: la falta de ductilidad¹ y la inestabilidad de su fractura². Las propiedades deseadas de las fibras son ductilidad y un comportamiento consistente ante esfuerzos de tensión. Los materiales que cumplen con esas propiedades son los metales.

La matriz que se propone consiste en una pasta cerámica de aluminosilicatos o arcillas y como refuerzo fibras continuas de acero inoxidable. El material compuesto creado debe mejorar las siguientes características comparado con el material tradicionalmente empleado para demostrar que se ha optimizado:

- I) Capacidad de absorción de energía;
- II) Módulo de elasticidad ;
- III) Modo de fractura estable.

¹ Capacidad de soportar deformaciones plásticas bajo esfuerzo de tensión.

² Fractura que se propaga de manera rápida, auto acelerada y es prácticamente imposible de detener.

Para conocer las propiedades deseadas se llevaron a cabo dos ensayos ASTM, E23-12c, Método estándar para prueba de impacto en barras indentadas y C1341-13, Método estándar para la evaluación ante esfuerzos de flexión de compuestos cerámicos avanzados reforzados con fibras continuas.

3.1 Diseño y fabricación del material compuesto

Como parte del análisis de factibilidad de integración del compuesto se analizaron las propiedades de compatibilidad entre los componentes. Se definen a continuación:

Matriz: cerámica compuesta de aluminosilicatos hidratados.

Fase de refuerzo: fibras continuas de acero inoxidable.

Tabla 4. Composición química del acero inoxidable AISI 316.

Elemento	Porcentaje (% de peso de elementos)
<i>Fe</i>	62-69
<i>Carbono, C</i>	0.08
<i>Manganeso, Mn</i>	2.0
<i>Fósforo, P</i>	0.04
<i>Azufre, S</i>	0.03
<i>Silicio, Si</i>	0.75
<i>Cromo, Cr</i>	16.0-18.0
<i>Niquel, Ni</i>	10.0-14.0
<i>Molibdeno, Mo</i>	2.0-3.0

Fuente. Clasificación de los acero inoxidable según norma AISI.

3.1.2 Puntos de fusión, degradación o descomposición

Se han obtenido los siguientes datos respecto a la fusión de los materiales propuestos, donde la principal preocupación es que la fibra metálica pueda soportar la temperatura de producción de la matriz cerámica, es sabido que en función de su composición química las aleaciones de acero presentan diversos puntos de fusión.

Varios factores afectan las características de fluencia de los metales, como por ejemplo, el Módulo de Elasticidad, la temperatura de fusión y el tamaño de grano. Por lo general un alto Módulo Elástico refleja un alto punto de fusión. Los aceros inoxidable son especialmente resistentes y se utilizan en aplicaciones con servicio a altas temperaturas ya que se ha determinado que estos conservan su integridad mecánica a temperaturas en atmósferas oxidantes de hasta 1000°C. (Callister, 2012).

Tabla 5. Temperatura de producción y fusión de los componentes del compuesto.

Material	Temperatura
Pasta cerámica de aluminosilicatos	Temperatura de producción de entre 800° y 1050°C.
Acero inoxidable	Temperatura de fusión aproximada 1400°C.

3.1.3 Oxidación y reducción

Se ha determinado que el color rojo característico de las piezas de arcilla cocida se debe al contenido de hierro en las mezclas o polvos cerámicos, por lo tanto, se asume que debido a que el acero es una aleación de hierro y carbono, la integración de fibras de acero en una matriz de arcillas no generara problemas de oxidación o reducción de los compuestos.

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se añade molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros.

3.1.4 Coeficientes de expansión térmica

En procesos constructivos ampliamente utilizados, el acero y las piezas cerámicas compuestas producidas a partir de arcillas coexisten y trabajan en conjunto. A temperatura ambiente ambos materiales poseen coeficientes de expansión térmica similares, lo que permite su integración en sistemas heterogéneos.

Tabla 6. Coeficientes de expansión térmica a temperatura ambiente de diversos materiales.

Material	Coeficiente de expansión térmica ($mm/mm/^\circ C$)
Concreto	7-11
Tabique de arcilla cocida sin prensar	7-8
Tabique de arcilla cocida prensada	3
Madera (sentido longitudinal a sus fibras)	3-4.5
Madera (Sentido transversal a sus fibras)	15.5-22.5 31-45
Acero al carbono	8-12

Fuentes: Laboratory, F. P. (2010). Wood Handbook. EUA. Association, B. I. (2006). Volume Changes. Analysis and Effects of Movement. EUA. Cardareli, F. (2008). Materials Handbook. EUA

3.2 Producción del compuesto y fabricación de probetas

El proceso de fabricación del material se propone de la siguiente manera:

1) Obtención del polvo. A partir de la fórmula especificada se obtendrá por molienda y tamizado el polvo cerámico de un tamaño de partícula $\leq 1 \text{ mm}$. Para esta etapa se requiere molino para polvos cerámicos y mallas para cribado para segregar una dimensión de partícula medida en mallas ASTM E/11-95 No. 18 (luz de 1.00 mm máximo.).

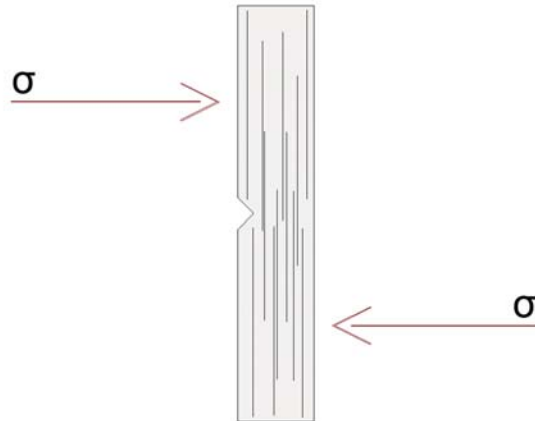
2) Mezclado. Una vez alcanzada la dimensión deseada de partícula en el polvo cerámico, este se humecta con agua caliente o vapor, hasta que el contenido de humedad sea de entre 20 – 25% (en peso). Se mezcla hasta obtener una consistencia homogénea. El equipo necesario para humectar es un mezclador de preferencia mecánico y báscula electrónica.

Variable experimental: dosificación de fibras. La dosificación de las fibras metálicas de refuerzo variara del 0% (base comparativa), al límite determinado por la geometría de la probeta.

3) Producción del compuesto. Humectada la pasta, el compuesto se fabricará por medio de producción de laminas, con una arquitectura de refuerzo unidireccional, en sentido perpendicular a la dirección del esfuerzo. El grosor de las láminas se determinará en función de la dosificación de fibras de la probeta a evaluar. El procedimiento consiste en aplicar en el molde una primera capa de pasta cerámica, inmediatamente después se agrega la cantidad de fibras deseada en la orientación especificada y se aplica una presión de 25 kg/cm^2 aproximados, el proceso se repite lograr las dimensiones deseadas de la probeta.

4) Secado. Se extrae la probeta del molde y se seca en horno hasta obtener un contenido de humedad menor al 2%. Para este proceso se recomienda un secado que considere una curva de temperatura de 30°-90°C durante un tiempo aproximado de 8hrs.

Figura 17. Esquema de la probeta y la orientación de las fibras para prueba.



5) Sinterización. Una vez secas las piezas se someten a un tratamiento térmico de hasta 850°C.

6) Enfriamiento. Una vez sinterizadas las piezas se deben enfriar de manera paulatina para evitar fisuración por cambio de temperatura abrupto, hasta lograr una temperatura ambiente, recomendada por los estándares de $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$.

7) Evaluación. Se realiza una inspección visual de cada probeta para garantizar que estén libres de daños o fisuras que puedan influenciar su desempeño durante su ensaye.

8) Ensaye y caracterización.

3.3 Síntesis. ASTM E23-12c. Método estándar para prueba de impacto en barras indentadas

Este estándar describe la prueba de impacto para barra indentada tipo Charpy y tipo Izod. Se dan las especificaciones y requerimientos de: probetas, procedimientos, informes, maquinaria.

I. Equipo esencial

- a) Especímenes/probetas adecuadas;
- b) Un juego de agarraderas;
- c) Un soporte adecuado para las probetas, donde esta recibirá el impacto de la masa en movimiento;
- d) Una masa en movimiento suficiente para fracturar la probeta;
- e) Un instrumento para medir la energía absorbida por la probeta.

II. Aparato de impacto

- a) Péndulo de construcción rígida, diseñado y construido en atención al Anexo I de este estándar.

III. Probeta o espécimen de prueba

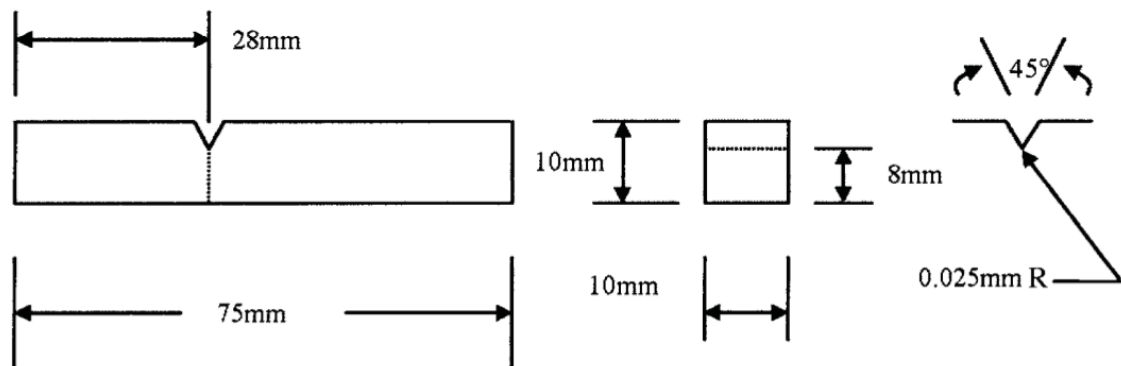
- a) Tomada del material según la especificación aplicable.
- b) Probeta Tipo Izod, según especificaciones de este estándar:

IV. Procedimiento de prueba

- a) Preparación del aparato según apartado 8.1 de este estándar.
- b) Consideraciones de temperatura. Se recomienda una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- c) Síntesis del procedimiento para probetas tipo Izod: se posiciona la probeta a la temperatura deseada en las agarraderas, se libera el péndulo garantizando que no exista vibración, la probeta es

impactada. Se obtiene información de la máquina y del espécimen fracturado.

Figura 18. Probeta para prueba de impacto tipo Izod (mm.)



V. Información obtenida de la prueba de impacto

- Energía absorbida. Se obtendrá a partir de la diferencia entre la energía del cuerpo en movimiento en el instante de impactar la probeta, y la energía del cuerpo en movimiento una vez fracturada la probeta.
- Porcentaje de fractura por cortante. Se determinará utilizando alguno de los métodos propuestos en el Anexo 4 de este estándar.

VI. Información del informe de resultados

- Tipo y tamaño de la probeta (en especificación con el estándar);
- Temperatura de la prueba;
- Energía absorbida;
- Apariencia de la fractura;
- Orientación de la probeta.

3.4 Síntesis. ASTM C1341-13. Método estándar para prueba de las propiedades de compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras continuas sometidos a esfuerzos de flexión a temperatura ambiente

Este procedimiento de prueba cubre la caracterización de las propiedades de flexión de compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras continuas, con una geometría de barras rectangulares fabricadas de manera directa o a través del corte de una pieza existente.

I. Procedimiento de prueba

- 1) Una barra de sección rectangular se prueba a flexión trabajando como viga.
- 2) El espécimen de prueba es deformado hasta que ocurra la fractura en las fibras externas, o hasta que la fuerza máxima alcanzada disminuya en un 20%.
- 3) Las propiedades de flexión del espécimen (resistencia y deformación a la flexión, resistencia a la fractura, Módulo de Elasticidad, curvas de esfuerzo deformación) son calculadas a partir de la fuerza y la deflexión, utilizando ecuaciones de vigas elásticas.

II. Interferencias

- a) La probeta sometida a esfuerzo puede fallar por esfuerzos de tensión, compresión, cortante, o por una mezcla de esfuerzos. Para obtener un valor de resistencia a la flexión válido, el material debe fallar en las fibras externas debido a tensión o compresión, por lo tanto la geometría del espécimen debe elegirse de tal forma que los esfuerzos de cortante se mantengan bajos en relación con los de tensión y compresión. Esto puede lograrse manteniendo una relación alta entre la longitud de soporte L , y el peralte/profundidad d , del espécimen.
- b) Se recomienda ampliamente la prueba de cuatro puntos, debido a que se conoce que una mayor porción de la probeta estará sometida a esfuerzos máximos de compresión y tensión, en comparación con la prueba de tres puntos.

III. Aparato de flexión

- a) La máquina utilizada para la prueba de las probetas bajo esfuerzos de flexión, deberá estar correctamente calibrada (certificada por una entidad reconocida), y deberá ser capaz de operar a tasas constantes de esfuerzo aplicado en la parte superior del espécimen, en el rango de velocidad requerido.
- b) Es necesario contar con medios para medir la deflexión del espécimen, apropiados a su temperatura y geometría.
- c) Es aceptable el uso de deformímetros, siempre y cuando la superficie del material sea poco porosa y sea posible cubrir un área suficientemente representativa de la probeta.
- d) Como mínimo debe obtenerse un récord autográfico de la fuerza aplicada y la deflexión en el centro del espécimen.

IV. Probeta o espécimen de prueba

- a) Los especímenes de prueba deben tener una relación peralte/profundidad L/d que produzca fallas por esfuerzos de tensión o de compresión en las fibras externas de la muestra sometida a esfuerzo. Se recomiendan tres relaciones: 16 : 1, 32 : 1, 40 : 1.
- b) La anisotropía en las propiedades mecánicas del compuesto esta fuertemente influenciada por la arquitectura del refuerzo. La alineación de las fibras en la dirección longitudinal del espécimen debe ser controlada y monitoreada.
- c) Las probetas pueden provenir desde cortes a hojas del material existente, hasta fabricadas a medida.
- d) En función de la aplicación del material, este podrá terminarse: como se fabrica; como será utilizado; personalizado; estándar.
- e) La respuesta mecánica del material es influenciada por la geometría de la probeta, la porosidad del material y las discontinuidades presentes. Es necesario inspeccionar visualmente, o de ser posible mediante pruebas no destructivas, el estado de las probetas para garantizar su buen estado.
- f) Se recomienda extremo cuidado en el manejo y almacenamiento de las probetas. El contenido de humedad debe estar regulado para que satisfaga la especificación del material.

- g) Un mínimo de 10 especímenes se requiere ensayar para propósitos de estimar una media.

V. Procedimiento

- 1) Se determinará el ancho y el largo del espécimen con una precisión de 0.02mm., en la sección sometida a esfuerzo es necesario realizar por lo menos tres mediciones.
- 2) El modo y la velocidad de la prueba tendrán una influencia importante en el comportamiento de la fractura en la cerámica incluso a temperatura ambiente. El modo de la prueba involucra la fuerza, el desplazamiento y el control de la deformación. La velocidad de la prueba se recomienda lo suficientemente veloz para obtener la resistencia a la flexión máxima posible del material.
- 3) La tasa de deformación es un mecanismo mediante el cual es posible controlar el proceso de deformación con el fin de evitar una fractura "fugitiva" (fractura veloz que conduce a una deformación y falla incontrolable). En la región lineal elástica del CCRFC (Compuesto cerámico reforzado con fibras continuas), la tasa de deformación puede relacionarse con la tasa del esfuerzo según las ecuaciones propuestas en este estándar.
- 4) La tasa de desplazamiento es detallada en función de la geometría y tamaño de la probeta. Este mecanismo es utilizado para controlar el desplazamiento de la probeta durante la ejecución de la prueba. La tasa de desplazamiento se calcula según las ecuaciones propuestas en este estándar, o según las tablas proporcionadas.

VI. Resultados que se calcularan a partir de la prueba de 3 puntos y de las ecuaciones y procedimientos enunciados en este estándar

- a) **Esfuerzo de flexión.**

$$\sigma = 3PL/(2bd^2)$$

σ = máximo esfuerzo en las fibras externas expresado en MPa

P = fuerza en un punto dado expresada en N

L = distancia entre soporteses en mm.
 b = ancho del espécimen en mm.
 d = grosor de la probeta en mm.

b) Deformación en flexión.

$$\varepsilon = 6Dd/L^2$$

ε = deformación en las fibras externas en flexión expresada en mm./mm.
 D = deflexión en el centro del espécimen en un punto dado en mm.

c) Resistencia a la flexión.

$$S_u = 3P_uL/(2bd^2)$$

S_u = resistencia máxima a la flexión expresada en MPa
 P_u = máxima fuerza aplicada expresada en N

d) Deformación en el punto de máxima fuerza aplicada.

$$\varepsilon_u = 6D_u d/L^2$$

ε_u = deformación ante esfuerzos de flexión expresada en mm.
 D_u = deflexión en el centro del espécimen en máxima fuerza en mm.

e) Resistencia a la fractura.

$$S_F = 3P_FL/(2bd^2)$$

S_F = resistencia a la fractura expresada en MPa
 P_F = fuerza de fractura expresada en N

f) Deformación en el momento de la fractura.

$$\varepsilon_F = 6D_F d/L^2$$

ε_F = deformación en el momento de fractura expresada en mm.
 D_F = deflexión en el centro del espécimen en la fuerza de fractura en mm.

VII. Información del informe

- a) Geometría del espécimen;
- b) Tipo y configuración de la máquina;
- c) Capacidad y precisión de la celda de carga;
- d) Método de recolección de datos;
- e) Tipo, configuración y resolución del equipo de medición de esfuerzo y deformación utilizado.
- f) Descripción de la geometría de carga (3 0 4 puntos).
- g) Propiedades del material. Constituyentes, proporciones, proceso de producción primario, fracción de fibras, especificación de las fibras, arquitectura del refuerzo, etc.
- h) Método de preparación de las probetas, incluyendo todas las etapas de producción.
- i) Ambiente de la prueba, incluyendo la temperatura y humedad relativa, la temperatura de los especímenes, y de ser aplicable, las condiciones de la cámara de prueba (pruebas en gases o condiciones especiales).
- j) Número total de especímenes evaluados, y número total de especímenes evaluados efectivamente.

4.0 Resultados experimentales

Los siguientes apartados describen el proceso que se llevó a cabo para la producción del compuesto reforzado de matriz cerámica y su ensaye mecánico.

4.1. Integración del material compuesto de matriz cerámica reforzado con fibras de acero

El primer paso en la producción del compuesto consistió en verificar la compatibilidad entre la fase matriz o solvente en este caso integrada por aluminosilicatos hidratados o arcillas, y la fase de refuerzo o soluto constituida por las fibras de acero integrados mediante un proceso de construcción laminar. Durante esta etapa, aunque se propuso integrar fibras de acero inoxidable, se integraron en sustitución de estas fibras de acero galvanizado, debido a que no se contaba con las fibras de acero inoxidable.

Prueba de compatibilidad entre materiales

La primera prueba consistió en integrar en una probeta¹ de 25 cm³ 100% compuesta de arcilla, fibras de acero galvanizado de 0.2 mm. de diámetro con una longitud de 4 cm. en una proporción de 5% del volumen de la probeta. Paralelamente se realizó una probeta integrada con la misma matriz pero sin refuerzo para validar los cambios inducidos por la fibra integrada. La producción de la probeta se resume de la siguiente manera:

- 1) Obtención del polvo.** Se adquirió arcilla comercial en estado saturado. Se secó la arcilla en un horno de gas hasta obtener un contenido de humedad < 2%, y posteriormente se trituró en un mortero de porcelana hasta obtener un polvo de granulometría homogénea.

¹ 1 cm de alto * 5 cm de largo * 5 cm de ancho

Figura 19. Arcilla en polvo.



- 2) **Integración de la pasta.** Al polvo de arcilla seco se agregó 20% de su peso en agua potable y se mezcló con medios mecánicos hasta obtener una pasta homogénea.
- 3) **Moldeo de la probeta.** Apoyándonos en un molde de madera, se procedió a integrar la probeta mediante la producción de capas de espesor similar, añadiendo un porcentaje de fibras entre cada capa de arcilla, con orientación consistente.
- 4) **Secado de la probeta.** Una vez integrados la matriz y el refuerzo, la probeta se sometió a un proceso de secado paulatino hasta 200°C para obtener un contenido de humedad de entre 0 – 2% previo al sinterizado. Esta etapa fue concluyente para la obtención de los primeros resultados.

Resultados obtenidos de la primera prueba

En estado bruto, esto es una fase matriz 100% de aluminosilicatos hidratados y una fase de refuerzo de fibras de acero, tal y como se adquieren comercialmente, no son compatibles para la integración de un material compuesto.

Al avanzar en el proceso de producción de la probeta se observó que durante el secado se generan **fisuras y fracturas** en el material reforzado con fibras, producto de la contracción por secado no homogénea de la matriz, causada por la adherencia entre la matriz y el refuerzo. Las fisuras y fracturas se presentan de manera ordenada, esto es en sentido perpendicular a la orientación del refuerzo y no de manera aleatoria. Se tomaron las siguientes medidas para avanzar en el proceso de integración del material:

- 1) Reducir la contracción de la pasta cerámica y,
- 2) Dar un tratamiento a la fibra que disminuya la adherencia con la matriz durante el proceso de fabricación del material.

Correcciones de composición

Para reducir la contracción en la arcilla producto del secado se decidió agregar un material antiplástico² a la pasta cerámica en distintas proporciones. El material seleccionado consiste en un polvo de cerámica técnica denominado alúmina u óxido de aluminio, material que a la vez que reduce la contracción por secado incrementa la resistencia mecánica del compuesto. Por lo tanto, la nueva pasta se integró por arcilla y alúmina, en distintas proporciones.

Para mejorar la adherencia entre la fibra y la matriz durante la etapa de producción del material se procedió a aplicar un recubrimiento hidrófugo³ en las fibras de acero. Dicho recubrimiento consistió de un baño de impermeabilizante elastomérico acrílico marca Sika.

² Material que no genera una pasta plástica al ser hidratado.

³ Impermeable.

Figura 20. Alúmina en polvo.



Figura 21. Fibra de acero con revestimiento hidrófugo.



Nuevamente se procedió a integrar una probeta⁴ de 25 cm^3 , esta vez compuesta de arcilla y alúmina en proporciones variables:

- a) 10% *alúmina* – 90% *arcilla*,
- b) 20% *alúmina* – 30% *arcilla*,
- c) 30% *alúmina* – 40% *arcilla*,
- d) 40% *alúmina* – 60% *arcilla*,
- e) 50% *alúmina* – 50% *arcilla*,

⁴ 1 cm de alto * 5 cm de largo * 5 cm de ancho

y fibras de acero con un revestimiento hidrófugo, de 0.2 *mm.* de diámetro con una longitud de 4 *cm.* en una proporción de 5% del volumen de la probeta. Paralelamente se realizó una probeta integrada con las matrices especificadas pero sin refuerzo para validar los cambios inducidos por la fibra. La producción de la probeta se resume de la siguiente manera:

- 1) **Obtención del polvo.** Se adquirió arcilla comercial en estado saturado. Se secó la arcilla en un horno de gas hasta obtener un contenido de humedad $< 2\%$, y posteriormente se trituró en un mortero de porcelana hasta obtener un polvo de granulometría homogénea. En seco se agregó la alúmina en las proporciones especificadas y se mezcló con medios mecánicos hasta obtener un polvo homogéneo.
- 2) **Integración de la pasta.** Al polvo de arcilla y alúmina seco se agregó 25% de su peso en agua potable y se mezcló con medios mecánicos hasta obtener una pasta homogénea. Fue necesario agregar más agua debido a la pérdida de plasticidad en la pasta producto de la introducción de un material antiplástico.
- 3) **Moldeo de la probeta.** Apoyándonos en un molde de madera, se procedió a integrar las probetas mediante la producción de capas de espesor similar, añadiendo un porcentaje de fibras entre cada capa de arcilla con orientación consistente.
- 4) **Secado de la probeta.** Una vez integrados la matriz y el refuerzo, la probeta se sometió a un proceso de secado controlado y paulatino hasta 200°C para obtener un contenido de humedad de entre 0 – 2% previo al sinterizado.

Hasta el paso número cuatro fue posible observar lo siguiente: la proporción que no presentó fracturas, pero si una pequeña fisura fue integrada por la pasta 50% *alúmina* – 50% *arcilla*. Por lo tanto la fisuración y fractura de las probetas se redujo notablemente con las acciones emprendidas.

Figura 22. Probeta con refuerzo fracturada durante el secado.



- 5) **Sinterizado hasta 400°C.** Al haber secado satisfactoriamente la probeta, presentando únicamente una pequeña fisura cerca del centro, esta se sometió a un tratamiento térmico progresivo hasta 400°C.

Posterior al tratamiento térmico hasta 400°C no se observaron cambios significativos en el material.

- 6) **Sinterizado hasta 850°C.** Para evaluar el límite de tratamiento térmico al que es posible someter el material, este se llevó a un proceso de sinterizado progresivo hasta 850°C.

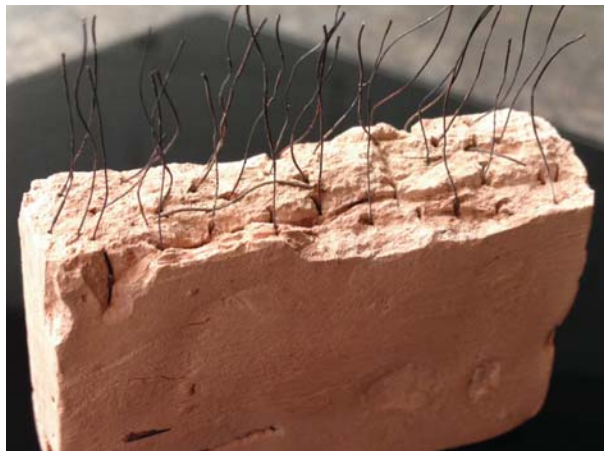
Posterior al tratamiento térmico hasta 850°C se observó lo siguiente:

- 1) El material inicialmente grisáceo adquirió un tono rojizo, producto de la transformación de las fases del material producto del tratamiento térmico.
- 2) La pequeña fisura localizada en el centro de la probeta se extendió a hasta los límites del material convirtiéndose en fractura.
- 3) Una vez separada en dos superficies la probeta se observó que el tratamiento hidrófugo desapareció, volviéndose el impermeabilizante elastomérico acrílico parte del material.
- 4) El acero galvanizado a 850°C sufre degradación.

Se tomaron las siguientes medidas para mejorar el comportamiento del material ante la fisuración durante el secado, la fractura durante el sinterizado y la degradación del acero de refuerzo:

- a) Incrementar la proporción de material antiplástico,
- b) Incrementar el diámetro de las fibras de refuerzo y reducir su porcentaje en volumen.

Figura 23. Probeta sometida a 850°C separada en dos cuerpos.



Prueba de estado último

Nuevamente se procedió a integrar en una probeta⁵ de 25 cm^3 , compuesta de arcilla y alúmina en proporciones variables:

- a) 60% *alúmina* – 40% *arcilla*,
- b) 70% *alúmina* – 30% *arcilla*,

y fibras de acero galvanizado con un revestimiento hidrófugo, de 0.5 mm . de diámetro con una longitud de 4 cm . en una proporción de 2.5% del volumen de la probeta. Paralelamente se realizaron probetas integradas con las matrices especificadas pero sin refuerzo. La producción de la probeta se resume de la siguiente manera:

- 1) **Obtención del polvo.** Se adquirió arcilla comercial en estado saturado. Se secó la arcilla en un horno de gas hasta obtener un contenido de humedad $< 2\%$, y posteriormente se trituró en un mortero de porcelana hasta obtener un polvo de granulometría homogénea. En seco se agregó la alúmina en las proporciones especificadas y se mezcló con medios mecánicos hasta obtener un polvo homogéneo.
- 2) **Integración de la pasta.** Al polvo de arcilla y alúmina seco se agregó 25% de su peso en agua potable y se mezcló con medios mecánicos hasta obtener una pasta homogénea.
- 3) **Moldeo de la probeta.** Apoyándonos en un molde de madera, se procedió a integrar las probetas mediante la producción de capas de espesor similar, añadiendo un porcentaje de fibras entre cada capa de arcilla, con orientación consistente.
- 4) **Secado de la probeta.** Una vez integrados la matriz y el refuerzo, la probeta se sometió a un proceso de secado controlado y paulatino hasta 200°C para obtener un contenido de humedad de entre 0 – 2% previo al sinterizado.
- 5) **Sinterizado hasta 400°C .** Al haber secado satisfactoriamente las muestras reforzadas unidireccionalmente, sin presentar fisuras, estas se sometieron a un tratamiento térmico progresivo de hasta 400°C .

⁵ $1 \text{ cm de alto} * 5 \text{ cm de largo} * 5 \text{ cm de ancho}$

Figura 24. Muestra reforzada sinterizada hasta 400°C sin fisuras observables.



Posterior al tratamiento térmico de hasta 400°C no se observaron cambios significativos en el material, ni se presentaron nuevas fisuras por secado, este permaneció estable.

- 6) Sinterizado hasta 850°C.** La muestra reforzada en un solo sentido se sometió a un tratamiento térmico de hasta 850°C.

Posterior al sinterizado hasta 850°C, no se observaron fisuras o fracturas, únicamente el cambio característico de color de gris a rojo claro.

4.1.1 Conclusiones del proceso de integración del material

- I) Con el proceso utilizado no fue posible integrar un compuesto únicamente constituido por una matriz de arcilla y fibras de refuerzo de acero.
- II) Con el proceso utilizado fue posible integrar un compuesto de matriz cerámica constituido por una combinación de arcillas y alúmina que incorpore fibras de acero tratadas con un recubrimiento hidrófugo.

- III) La pasta cerámica que presenta las características necesarias para la constitución del compuesto se componen de un rango de 60-70% alúmina y 40-30% arcillas.
- IV) Existe un límite de cantidad de refuerzo que se puede integrar a una probeta de geometría dada.
- V) El rango térmico de producción del material hasta esta etapa se fija en 850°C.
- VI) Se ha determinado que el proceso de integración laminar puede emplearse para la producción de piezas de geometrías evaluables.

4.2 Prueba de impacto en modalidad IZOD

Se procedió a la fabricación de las probetas de ensaye tipo IZOD para prueba de impacto, siguiendo el procedimiento antes mencionado en la fabricación del compuesto, en esta etapa se sustituyeron las fibras de acero galvanizado por fibras de **acero inoxidable** según la propuesta de experimentación. Las propiedades de las probetas fabricadas se enuncian a continuación.

Tabla 7. Probetas IZOD fabricadas.

Tipo	Pasta		Fibras de acero inoxidable AISI 316			Número de probetas
	% Arcillas	% Alúmina	Diámetro, mm	Longitud, mm	Dosificación, % volumen	
IZ-0	30	70	-	-	-	3
IZ-1	30	70	0.8	70	1	3

Figura 25. Probeta tipo IZOD de 7.5 cm³ con 1% de fibra en volumen sinterizadas a 850°C.



En la fabricación de las probetas pudimos observar que para una probeta IZOD el límite de refuerzo de fibras continuas de 0.8 mm. de diámetro y 70 mm. de longitud, es de 1% en volumen. El procedimiento especificado permitió integrar fibras metálicas de acero inoxidable y galvanizado.

La prueba de impacto permite evaluar el comportamiento del material en condiciones severas de trabajo, ya que **se desarrollan velocidades de deformación elevadas**. Se evalúa una probeta en forma de barra de sección cuadrada de $10\text{ mm.} * 10\text{ mm.}$, con una longitud de 75 mm. El interés consiste en que se analiza la ductilidad del material de una manera diferente que en una prueba estática, donde debido a la velocidad de la aplicación del esfuerzo las moléculas no tiene la oportunidad de adaptarse al esfuerzo de la misma manera en la que se adaptan en una prueba con menores tasas de deformación.

Un péndulo pesado, inicia su movimiento desde una altura h , describe un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta; llega a una altura final hf menor. Se conocen las alturas inicial y final del péndulo, y se calcula la diferencia en su energía potencial. Esta diferencia es la energía de impacto absorbida durante la falla o ruptura de la probeta.

La prueba de impacto se llevó a cabo en la **modalidad IZOD**. El equipo utilizado fue un Tinius Olsen Plastic Impact Tester, con escala para impacto de $57.6\text{ kg} - \text{cm}$. Se evaluaron 6 probetas, descritas en la Tabla 9. El informe de resultados es el siguiente.

Probeta 1

Tipo de probeta: ***Probeta tipo IZ-0.***

Temperatura de la prueba: **$25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.**

Energía absorbida: **$2.5\text{ kg} - \text{cm}$.**

Tenacidad de fractura: **2,500 J/m²**

Orientación de la probeta: *sin fibras de refuerzo.*

Probeta 2

Tipo de probeta: *Probeta tipo IZ-0.*

Temperatura de la prueba: **25°C ± 1°C.**

Energía absorbida: **2.0 kg – cm.**

Tenacidad de fractura: **2,000J/m²**

Orientación de la probeta: *sin fibras de refuerzo.*

Probeta 3

Tipo de probeta: *Probeta tipo IZ-0.*

Temperatura de la prueba: **25°C ± 1°C.**

Energía absorbida: **2.0 kg – cm.**

Tenacidad de fractura: **2,000J/m²**

Orientación de la probeta: *sin fibras de refuerzo.*

Probeta 4

Tipo de probeta: *Probeta tipo IZ-1.*

Temperatura de la prueba: **25°C ± 1°C.**

Energía absorbida: **6.5 kg – cm.**

Tenacidad de fractura: **6,500 J/m²**

Orientación de la probeta: *fibras en el sentido perpendicular al impacto.*

Probeta 5

Tipo de probeta: *Probeta tipo IZ-1.*

Temperatura de la prueba: **25°C ± 1°C.**

Energía absorbida: **6.5 kg – cm.**

Tenacidad de fractura: **6,500 J/m²**

Orientación de la probeta: *fibras en el sentido perpendicular al impacto.*

Probeta 6

Tipo de probeta: *Probeta tipo IZ-1.*

Temperatura de la prueba: **20°C ± 5°C.**

Energía absorbida: **8.0 kg – cm.**

Tenacidad de fractura: **8,000 J/m²**

Orientación de la probeta: *fibras en el sentido perpendicular al impacto.*

4.2.1 Conclusiones de la prueba de impacto

I) Las probetas reforzadas presentaron valores de tenacidad⁶ y capacidad de absorción de energía más de 3 veces superiores que aquellas sin refuerzo.

Tabla 8. Tabla resumen de las propiedades observadas.

	Tipo	Fibras, %V	Síntesis, °C	AE, kg-cm	Tenacidad, J/m ²
Probeta 1	IZ-0	0	850	2.5	2500
Probeta 2	IZ-0	0	850	2	2000
Probeta 3	IZ-0	0	850	2	2000
Probeta 4	IZ-1	1	850	6.5	6500
Probeta 5	IZ-1	1	850	6.5	6500
Probeta 6	IZ-1	1	850	8	8000

II) **Al incrementar la tenacidad se evidencia que se incrementó la ductilidad del material y la resistencia a la fractura, objetivos de la propuesta experimental.** El comportamiento del material se explica como una grieta que avanza a alta velocidad y al encontrar una fase de refuerzo esta requiere más energía para continuar su propagación. Lo que indica que ante pruebas de cargas estáticas el comportamiento presentará un momento elástico hasta lograr la fractura de la matriz y entonces iniciar el momento de deformación y trabajo de las fibras, validando así el potencial de fijar estados límites de servicio en los materiales cerámicos reforzados ante cualquier clase de esfuerzo.

⁶ Capacidad de un material de absorber y ceder energía.

III) El coeficiente de correlación, r , entre el incremento en la capacidad de absorción de energía del material y la tenacidad de fractura, respecto a la introducción de fibras de refuerzo es igual a 0.98, y el coeficiente de determinación, r^2 , es igual a 0.96. La función de ajuste para tenacidad y absorción energética en el material, donde x representa la dosificación de fibras en volumen:

$$\text{Absorción de energía} = 2.1667 + 4.8333x$$

$$\text{Tenacidad} = 2166.7 + 4833.3x$$

Figura 26. Absorción de energía.

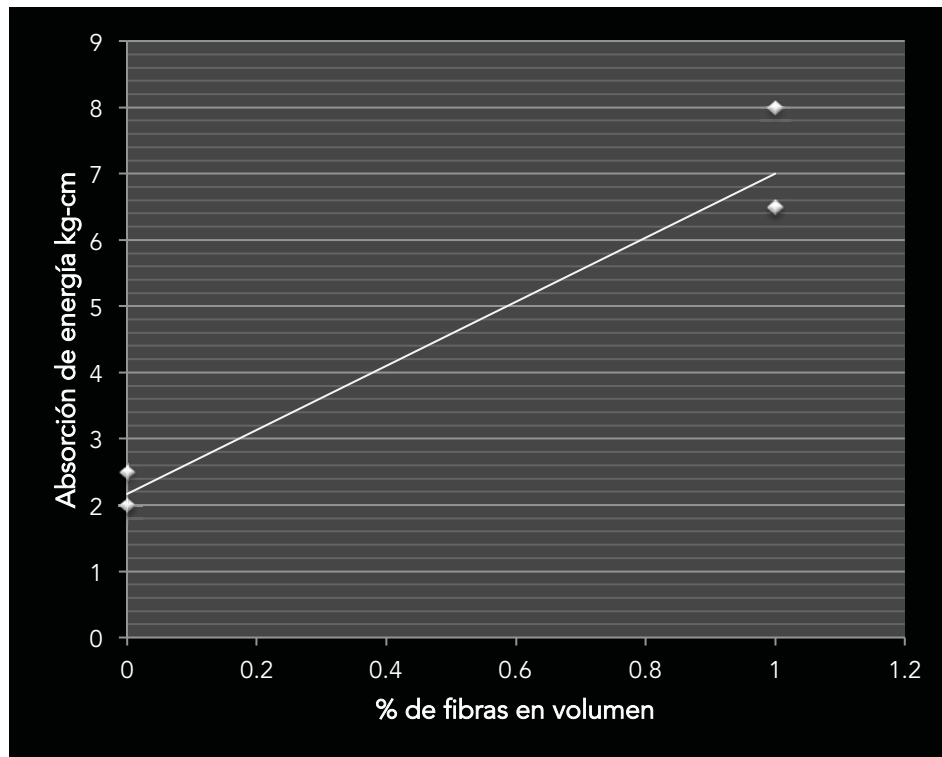
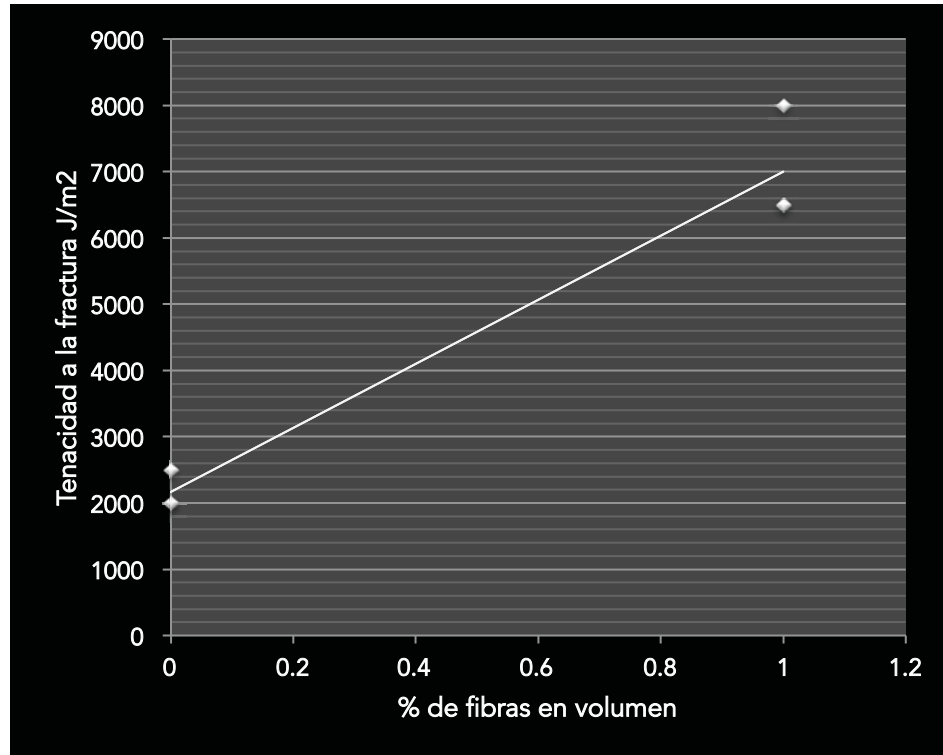


Figura 27. Tenacidad a la fractura.



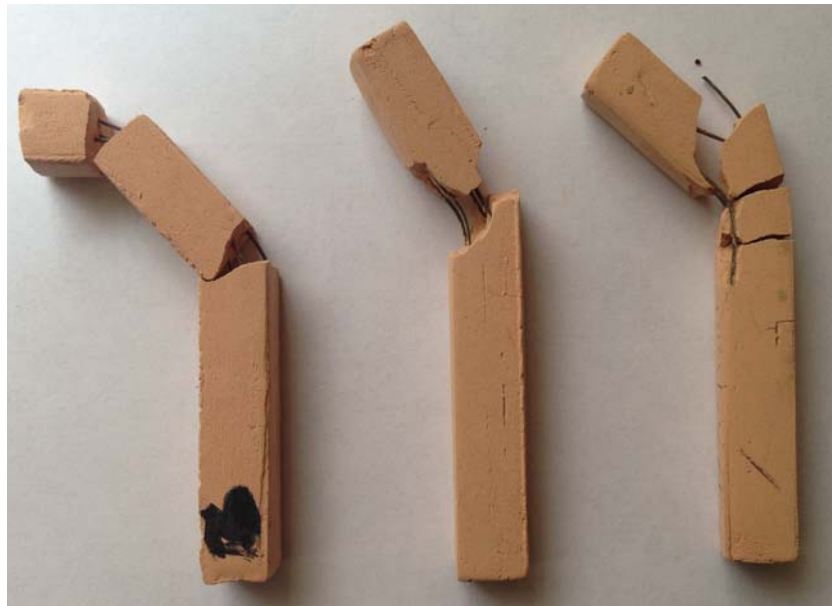
IV) Posterior a un tratamiento térmico de hasta 850°C el acero inoxidable AISIS 316 preserva su integridad mecánica.

V) Las fibras de las probetas reforzadas no se fracturaron, lo que indica que la adherencia entre la matriz y la fibra puede incrementarse.

Figura 28. Probetas IZOD sin refuerzo fracturadas.



Figura 29. Probetas IZOD con refuerzo fracturadas.



4.3 Ensayo de flexión

La siguiente observación tiene como objetivo validar la posibilidad de utilizar el material compuesto creado para aplicaciones estructurales donde las piezas cerámicas puedan tomar esfuerzos de flexión. Si bien no se determinó una resistencia estadísticamente válida, ya que solo se evaluó una probeta, si podemos evaluar si el material reforzado se comportará como se predijo teóricamente. Esto quiere decir que se logrará un momento elástico, donde trabajan matriz y refuerzo en conjunto, se fractura la matriz y posterior a la fractura de la matriz se da una etapa donde fibras y matriz toman esfuerzos de tensión y compresión respectivamente logrando una etapa similar a la plasticidad en los metales.

Para el desarrollo de esta prueba se sometió a esfuerzo de flexión una barra del material compuesto desarrollado, fabricada de la misma manera que las probetas IZOD mencionadas anteriormente, de sección cuadrada de 10 mm. * 10 mm., con una longitud de 75 mm. reforzada con fibras de acero inoxidable. La modalidad de la prueba fue de 3 puntos en un equipo universal Shimadzu modelo AG-I de 5 toneladas con accesorios cilíndricos Instron. La distancia entre apoyos fue de 50 mm. Las características de la probeta se enuncian en la siguiente tabla:

Tabla 9. Probeta de flexión.

Tipo	Pasta		Fibras de acero inoxidable			Número de probetas
	% Arcillas	% Alúmina	Diámetro, mm	Longitud, mm	Dosificación, % volumen	
Fx-0	100	0	-	-	-	1
Fx-1	30	70	0.8	70	1	1

El comportamiento observado y los resultados obtenidos se confrontaron con el presentado al ensayar un tabique de barro rojo cocido tradicional, de sección rectangular de 65 mm. * 135 mm., con una longitud de 280 mm. en la misma modalidad 3 puntos, con distancia entre apoyos de 180 mm.

Se observó el siguiente comportamiento en el material reforzado:

- 1) Se da un momento elástico lineal hasta alcanzar una carga de 55.45 N, momento donde se fractura la matriz cerámica. La probeta no se separa totalmente, si no que la **fractura avanza de manera estable**.
- 2) Posterior a la fractura inicial la carga aplicada disminuye, para posteriormente incrementarse hasta alcanzar un valor máximo de 72.5 N.
- 3) La deformación en el material es considerable. La prueba concluye cuando el material está tan deformado que comienza nuevamente a trabajar a compresión al entrar en contacto con los accesorios de apoyo.

Figura 30. Gráfica fuerza-deflexión en ensayo de flexión, cerámica reforzada.

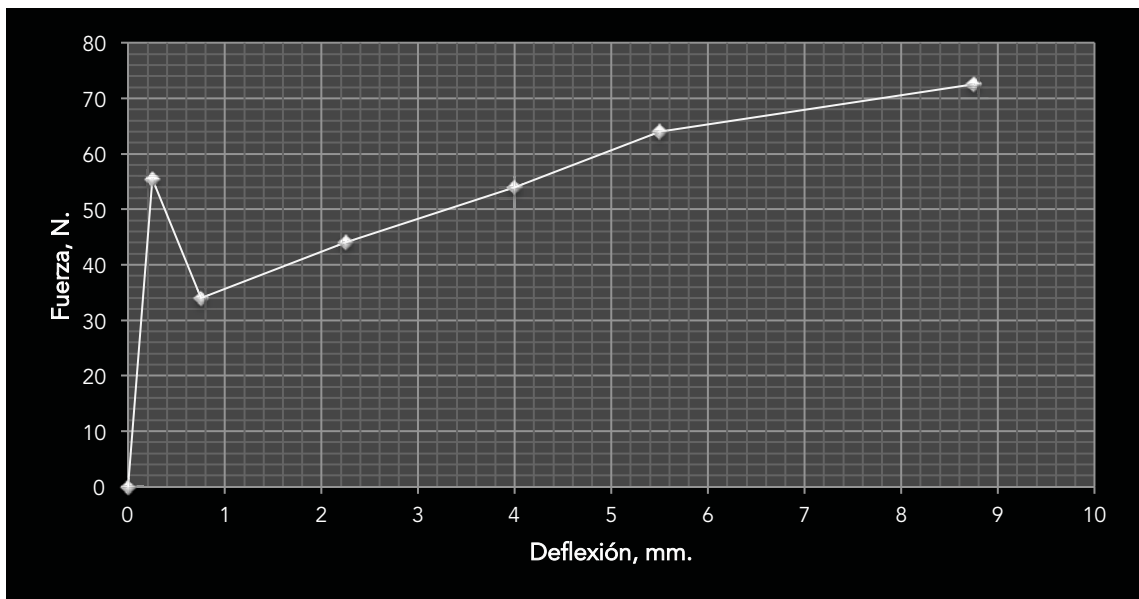
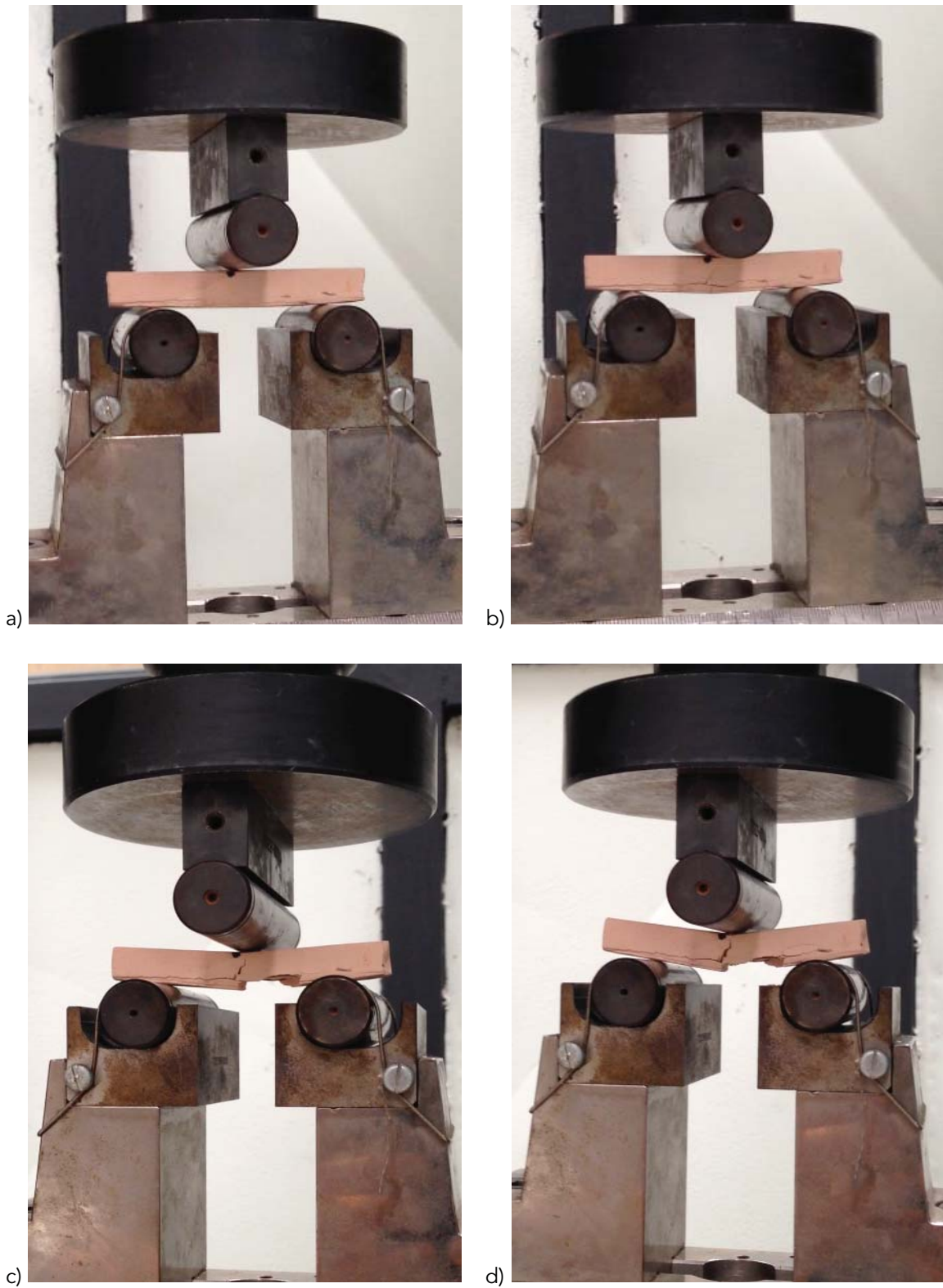


Figura 31. Ensaye de flexión a probeta de cerámica reforzada.



En las figuras anteriores podemos observar: un momento inicial donde comienza la aplicación de la carga, la probeta no presenta fisuras (a); la fisura inicial, momento donde decrece la carga aplicada, se observa el inicio de una fisura por flexión (b); momento donde la fisura inicial se ha expandido, aunque de manera estable, la carga aplicada incrementa (c); deformación cercana a la carga última (d).

Se observó el siguiente comportamiento en el material tradicional:

- 1) Se da un momento elástico lineal hasta alcanzar una carga de 1,780 N, momento donde se fractura la pieza. La probeta se separa totalmente, la fractura avanza de **manera inestable**.

Figura 32. Gráfica fuerza-deflexión en ensaye de flexión, cerámica tradicional.

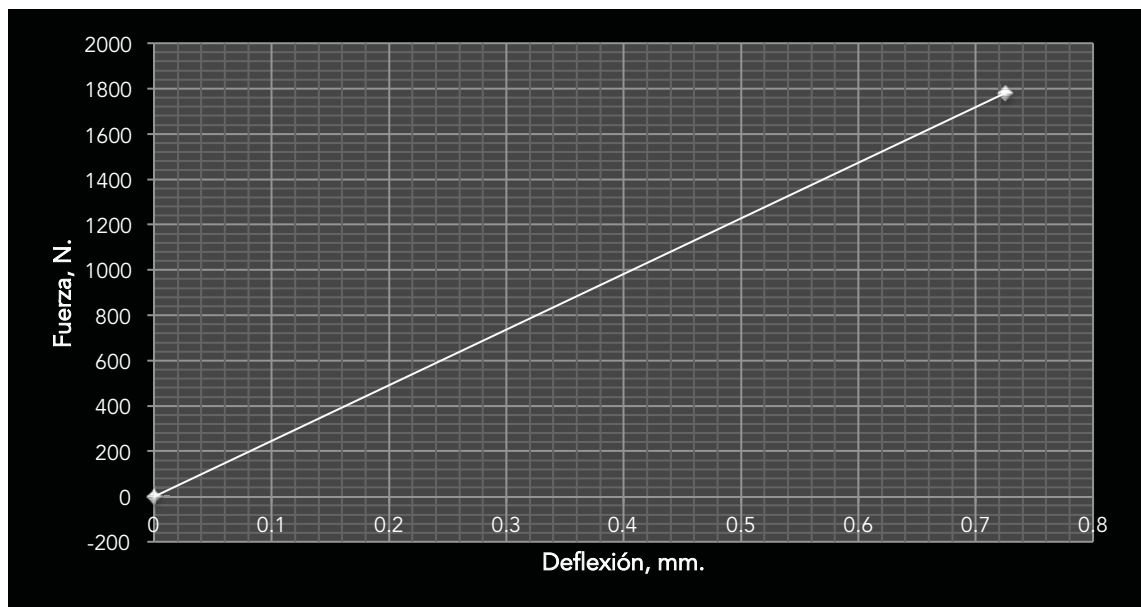
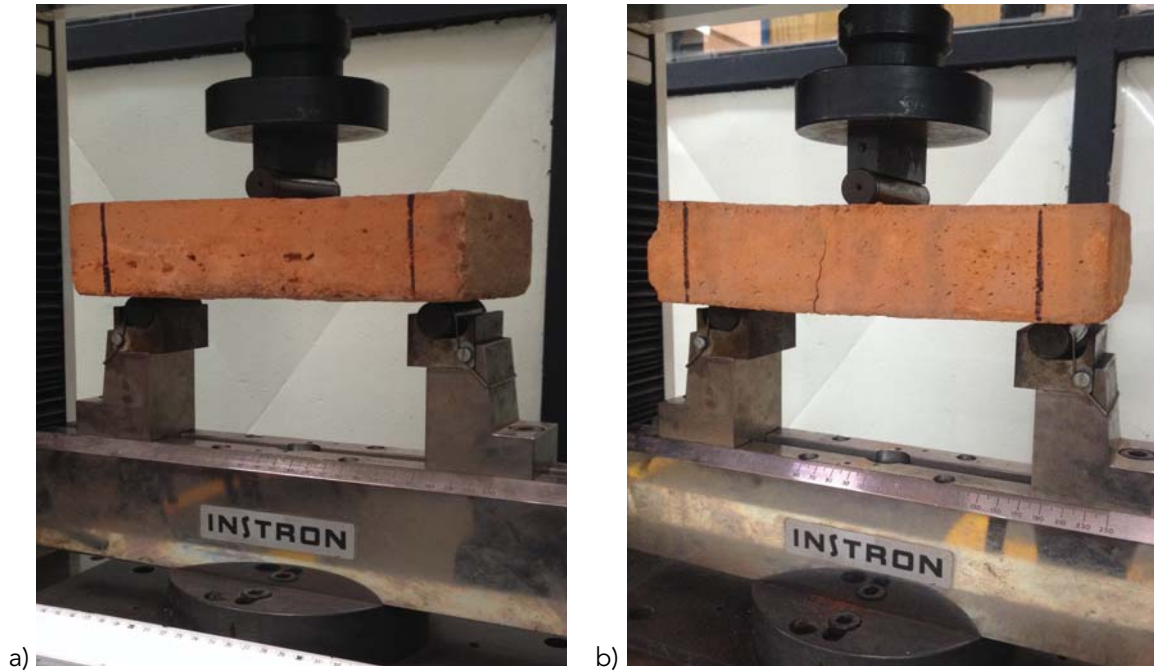


Figura 33. Ensaye de flexión a probeta de cerámica tradicional.



4.3.1 Comparación del comportamiento a flexión entre el material reforzado y el material tradicional

Como parte de la comparación observada del comportamiento ante esfuerzos de flexión entre la cerámica reforzada y la cerámica tradicional, se utilizaron las ecuaciones propuestas por el estándar ASTM-C1341 para determinar la resistencia de los materiales a la flexión y el Módulo de Elasticidad Tangente.

Resistencia a la fractura en flexión, S_F , y resistencia última a la flexión, S_U :

La resistencia a la fractura en flexión y la resistencia última a la flexión se calcularon a partir de las expresiones enunciadas en el estándar referido en el apartado de método experimental.

En el material tradicional, $S_F = S_U = 0.85 \text{ N/mm}^2 = 8.7 \text{ kg/cm}^2$.

En el material reforzado, $S_F = 4.16 \text{ N/mm}^2 = 42.4 \text{ kg/cm}^2$, $S_U = 5.4 \text{ N/mm}^2 = 55 \text{ kg/cm}^2$.

Figura 34. Resistencia a la fractura en flexión.

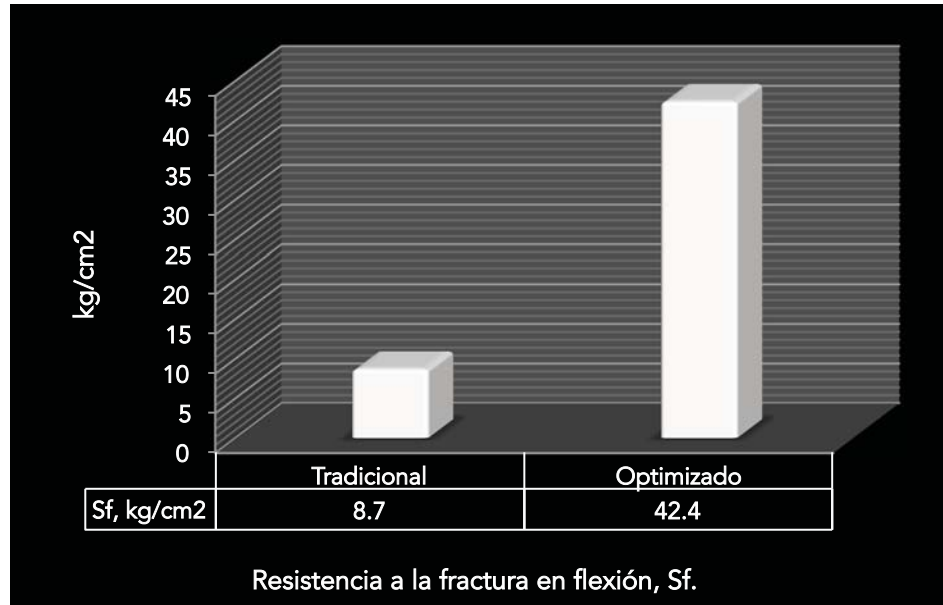
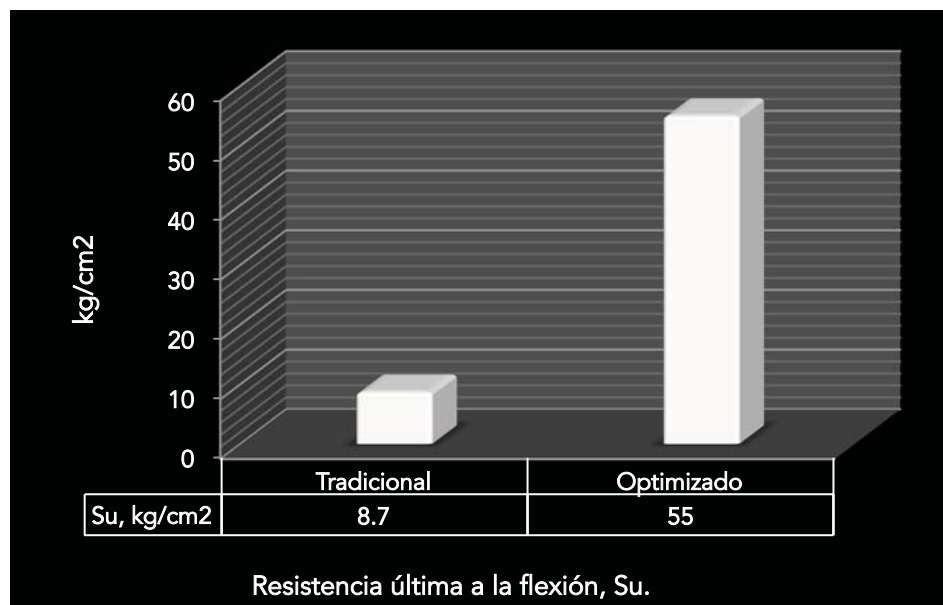


Figura 35. Resistencia última a la flexión.



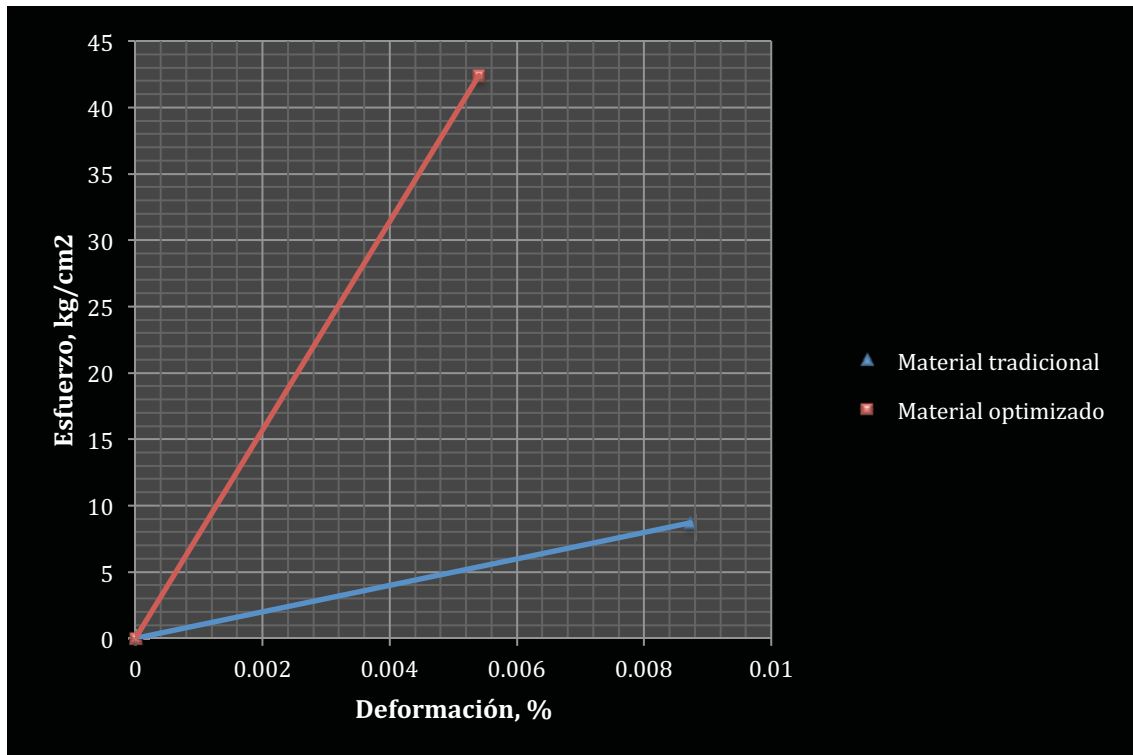
Módulo de Elasticidad tangente, E :

El Módulo de Elasticidad tangente, E , se calculó a partir de la expresión enunciada en el estándar referido en el apartado de método experimental.

En el material tradicional, $E = 100 \text{ N/mm}^2 = 1.020 \text{ kg/cm}^2$.

En el material reforzado, $E = 700 \text{ N/mm}^2 = 7,138 \text{ kg/cm}^2$.

Figura 36. Gráfica esfuerzo-deformación en flexión.



Los valores de las variables necesarias para la solución de las expresiones se tomaron de la siguiente manera:

Tabla 10. Variables de flexión.

Variable	Probeta	
	Cerámica reforzada con fibras continuas	Tabique de barro rojo cocido tradicional
P_F	55.45 N	1,780 N
P_u	72.5 N	1,780 N
L	50 mm.	180 mm.
b	10 mm.	135 mm.
d	10 mm.	65 mm.
m	225 N/mm	2,543 N/mm

4.3.2 Conclusiones del comportamiento observado ante esfuerzos de flexión

I) La contrastación entre el comportamiento que presenta el material cerámico compuesto reforzado con fibras y el material cerámico tradicional permite concluir que **se optimizan los aspectos de resistencia, Módulo de Elasticidad y fractura**, cuando a una pasta de arcillas se incorporan cerámicas técnicas, en este caso alúmina, y una fase de refuerzo metálico, en este caso las fibras de acero inoxidable.

II) El hecho de observar un momento elástico lineal hasta un punto de fractura inicial, continuado por un momento de trabajo conjunto fibras-matriz hasta alcanzar un punto de ruptura en el material reforzado, valida la posibilidad de establecer estados límites de servicio en materiales cerámicos reforzados para diseño ante esfuerzos de flexión.

III) Se observó un comportamiento de fractura estable, indicador clave en el uso seguro de materiales cerámicos reforzados en aplicaciones estructurales.

IV) El ensaye realizado valida el comportamiento teórico predicho, sin embargo no constituye un procedimiento que permita fijar valores de resistencia estadísticamente representativos.

4.4 Evaluación del comportamiento mecánico de las fibras de acero inoxidable

Para evidenciar que la selección de la fase de refuerzo fue la indicada, sometimos a ensaye de tensión 3 fibras de acero inoxidable AISI 316, iguales a las utilizadas en la integración del material propuesto. El objetivo del ensaye consiste en validar que las fibras presentaran valores de resistencia a la tensión elevados, Módulo de Elasticidad elevado, ductilidad, y consistencia en su comportamiento.

Figura 37. Montaje de las fibras de acero inoxidable en el equipo de ensaye.

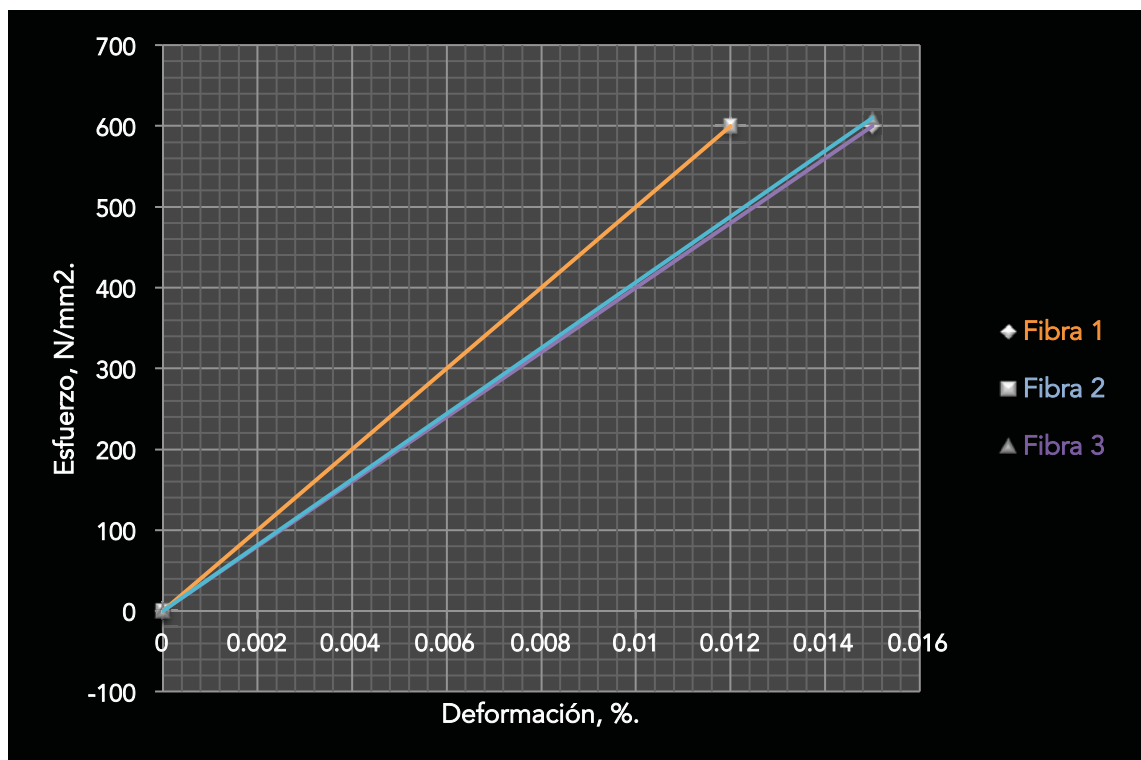


Para el desarrollo de esta prueba se sometieron a esfuerzo de tensión uniaxial 3 fibras de sección circular de 0.08 mm . de diámetro, con una longitud calibrada de 100 mm . La prueba se llevo a cabo en un equipo universal Shimadzu modelo AG-I de 5 toneladas.

Se observó el siguiente comportamiento en las fibras de acero inoxidable:

Las fibras presentaron el comportamiento típico de los metales ante el esfuerzo de tensión.

Figura 38. Gráfica esfuerzo-deformación en tensión de las tres fibras ensayadas.



Los valores calculados de Módulo de Elasticidad y resistencia a la tensión son:

Tabla 11. Propiedades de las fibras de acero inoxidable.

	Probeta		
	Fibra 1	Fibra 2	Fibra 3
Módulo de Elasticidad	407,900 kg/cm^2	509,900 kg/cm^2	407,900 kg/cm^2
Resistencia a la tensión	7,842 kg/cm^2	7,265 kg/cm^2	7,903 kg/cm^2

Por lo tanto, el Módulo de Elasticidad medio es igual a 441,900 kg/cm^2 , con una desviación estándar de 58,890 kg/cm^2 , la resistencia a la tensión media es igual a 7,670 kg/cm^2 , con una desviación estándar de 352 kg/cm^2 .

4.4.1 Conclusiones del comportamiento mecánico de las fibras de acero inoxidable

l) Las fibras seleccionadas fueron las adecuadas, ya que el 98% de las fibras alcanzaran valores de Módulo de Elasticidad superiores a 475,000 kg/cm^2 , así mismo el 100% de las fibras lograran superar los 7,000 kg/cm^2 de resistencia a tensión. En todos los casos se observó un comportamiento y fractura dúctil, validado por observación de la fractura bajo microscopio.

Conclusiones del proceso experimental

I) Durante el proceso de integración del material se determinó que para poder utilizar arcillas en la producción de compuestos de matriz cerámica reforzados por fibras de acero, es necesario adicionar a la pasta materiales que reduzcan la contracción durante el secado. En este caso en particular se optó por utilizar alúmina, en función de las propiedades mecánicas del material. La proporción final evaluada constó en peso, de 30% de arcillas y 70% alúmina.

II) En probetas constituidas con la proporción de materiales mencionada, el refuerzo en forma de fibras al buscarse la menor relación diámetro-longitud (fibras lo más largas posible), genera que la geometría de la pieza determine un límite de refuerzo que pueda contener. En este caso, observamos que una probeta con una relación de lados 1:5:5 pudo contener hasta 2.5% de su volumen en fibras, mientras que una probeta con una relación de lados 1:1:7 pudo contener hasta 1% de su volumen en fibras. Se hace necesaria más exploración en los aspectos geométricos del material, desde el punto de vista de su proceso de integración.

III) Se logró dar un tratamiento térmico de hasta 850°C al material cerámico reforzado con fibras de acero. En relación a este aspecto la principal preocupación consistía en observar el comportamiento del acero posterior al tratamiento térmico. Se determinó que hasta 850°C el acero inoxidable que contenían las probetas ensayadas preservó su integridad mecánica. Por otro lado la observación de la pasta de las probetas fracturadas utilizando una lente magnificadora puso de manifiesto porosidad en el material, lo que indica que es necesario incrementar la temperatura o prolongar el tiempo de tratamiento térmico con la finalidad de lograr un mayor nivel de densificación, buscando el punto que permita maximizar las propiedades de la cerámica y preservar las propiedades del metal.

IV) La adición de fibras de refuerzo metálicas en materiales de constitución cerámica demostró ser un mecanismo efectivo para la optimización de las propiedades mecánicas y de fractura de la matriz. La capacidad de absorción energética y tenacidad a la fractura medidas en la pasta de arcillas y alúmina utilizada, incremento a razón de: *absorción de energía* = $2.1667 + 4.8333x$, *tenacidad* = $2166.7 + 4833.3x$, en función de la cantidad de fibras en volumen, x , integrada. El coeficiente de correlación igual a 0.98, y el coeficiente de determinación, r^2 , igual a 0.96, al ser muy cercanos a 1 demuestran la validez del modelo de análisis.

V) El incremento en la tenacidad al estar estrechamente relacionado con la resistencia a la tensión del material (Somiya, 2013) constituye la validación de la eficiencia del proceso desarrollado, ya que el objetivo es lograr cerámicas estructurales capaces de tomar de manera segura esfuerzos de cualquier clase, ya sea que exista compresión, tensión, torsión, o una combinación, al igual que evitar la fractura repentina y catastrófica producto de las tensiones inducidas por los cambios en los gradientes térmicos del ambiente o del material.

VI) Al analizar las probetas IZOD tras el ensaye de impacto, observamos que ninguna fibra se fracturó, se hace necesario buscar mejorar la adherencia matriz y fibra, o lograr longitudes de fibras que permitan que se alcancen los esfuerzo de fluencia en las fibras.

VII) En el ensaye de flexión pudimos observar dos cosas de gran interés. En primera instancia, en el compuesto cerámico reforzado pudieron determinarse de manera independiente la resistencia a la fractura por flexión, S_F , y la resistencia última a la flexión, S_U , situación que demuestra la estabilización de la fractura gracias a la adición de las fibras. En el material tradicional $S_F = S_U$, por lo tanto la fractura es inestable. En segundo lugar tanto la resistencia como el Módulo de Elasticidad tangente se determinaron superiores en el compuesto reforzado.

VIII) Las fibras de acero inoxidable fueron una opción de refuerzo adecuada, ya que el acero inoxidable preservó su integridad mecánica aun después de un tratamiento térmico de 850°C ., la resistencia a la tensión media obtenida del ensaye superior a $7,000\text{ kg/cm}^2$, pone de manifiesto la capacidad del acero inoxidable sobre otros acero aleados, y la ductilidad deseada como propiedad complementaria a la fragilidad de la matriz, se observó tanto en el Módulo de Elasticidad como en las fibras fracturadas vistas bajo el microscopio.

5.0 Conclusión general y propuestas de continuidad

El proyecto de investigación nació como una idea de optimización de un proceso constructivo mediante la mejora en las propiedades mecánicas de las piezas utilizadas en la elaboración de tableros arquitectónicos portantes.

El estudio de la naturaleza de los materiales cerámicos desde una perspectiva distinta a la arquitectura, la perspectiva de la ingeniería mecánica y de la ciencia de materiales, hizo posible hacer una propuesta de optimización energética estructural. En una primera instancia se comprendió que las propiedades mecánicas de las cerámicas dependen del arreglo de su estructura atómica y de las propiedades de su microestructura, en donde el proceso de sinterización es el responsable de la densidad y estabilidad química de los materiales cerámicos.

Una de las mayores limitaciones de las cerámicas estructurales es su pobre resistencia a la fractura. Lo que se traduce en que ante esfuerzos de tensión la falla en materiales cerámicos se da de manera repentina, total y catastrófica, y la resistencia presenta importantes variaciones. A la vez que el agrietamiento se propaga de manera rápida, auto acelerada e imposible de detener, este agrietamiento es considerado inestable.

El factor esencial en el diseño de mecanismos de fortalecimiento en cerámicas consiste en incrementar la cantidad de energía necesaria para la propagación de grietas. Se determinó que el refuerzo por puenteo o crack bridging es considerado el mecanismo más efectivo de optimización mecánica.

Como medio para lograr la optimización del comportamiento mecánico de los materiales cerámicos se analizaron las propiedades y naturaleza de los materiales compuestos. Se comprendió que los materiales compuestos combinan dos o más clases de materiales para proveer prestaciones específicas

o superiores en los materiales. Se analizaron diversas clases de materiales para uso como refuerzo para mejorar la capacidad de trabajar ante esfuerzos de tensión en un componente, donde se concluyó que los materiales metálicos representan una excelente opción, ya que estos se distinguen entre otras cosas por ser dúctiles y conformados en fibras poseen altos grados de resistencia y un comportamiento consistente.

Se determinó que para integrar un material compuesto es necesario que se den condiciones de compatibilidad entre las fases matriz y refuerzo, en aspectos de producción, proceso y vida útil. Y se requiere una longitud crítica de refuerzo (fibra) para observar un cambio significativo en las propiedades de un material compuesto. Si se logran condiciones de orientación preferente, longitud crítica, y dosificación, la resistencia, el Módulo de Elasticidad y la deformación del material compuesto refleja la combinación de las fases.

Comprendida la naturaleza de las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos fue sencillo relacionarlas con los aspectos operativos o soluciones constructivas que se han adoptado para resolver las necesidades de la edificación. Las arcillas o aluminosilicatos hidratados constituyen el principal componente en la producción de piezas cerámicas estructurales, donde el proceso de extrusión y sinterizado garantizan altos valores de resistencia ante esfuerzos de compresión. El pobre desempeño mecánico de los materiales cerámicos ante esfuerzos donde existan tensiones se ve reflejado en los valores de diseño propuestos por las Normas Mexicanas, donde se confirma la relación 1:10 respecto a la capacidad compresión-tensión. Y dado que existen esfuerzos de compresión, cortante, flexión, tensión y torsión en los tableros de mampostería, se establece que toda tensión presente es resistida por el acero de refuerzo incorporado.

El proceso experimental desarrollado al haber evidenciado una transformación y mejora en el comportamiento de los materiales cerámicos tradicionales, indica un camino que puede conducirnos a la producción de piezas de naturaleza cerámica que nos permita repensar y transformar los procesos constructivos tradicionales, con fines de optimización.

Durante el proceso de integración del material se determinó que para poder utilizar arcillas en la producción de compuestos de matriz cerámica reforzados por fibras de acero, es necesario adicionar a la pasta materiales que reduzcan la contracción durante el secado. En este caso en particular se optó por utilizar alúmina, en función de las propiedades mecánicas del material.

La proporción final evaluada constó en peso, de 30% de arcillas y 70% alúmina. En probetas constituidas con la proporción de materiales mencionada, el refuerzo en forma de fibras al buscarse la menor relación diámetro-longitud (fibras lo más largas posible), genera que la geometría de la pieza determine un límite de refuerzo que pueda contener. En este caso, observamos que una probeta con una relación de 1:1:7 pudo contener hasta 1% de su volumen en fibras. Se hace necesaria más exploración en los aspectos geométricos del material, desde el punto de vista de su proceso de integración.

Se logró dar un tratamiento térmico de hasta 850°C al material cerámico reforzado con fibras de acero. En relación a este aspecto la principal preocupación consistió en observar el comportamiento del acero posterior al tratamiento térmico. Se determinó que hasta 850°C el acero inoxidable que contenían las probetas ensayadas preservó su integridad mecánica. Por otro lado la observación de la pasta de las probetas fracturadas utilizando una lente magnificadora puso de manifiesto porosidad en el material, lo que indica que es necesario incrementar la temperatura o prolongar el tiempo de tratamiento térmico con la finalidad de lograr un mayor nivel de densificación, buscando el punto que permita maximizar las propiedades de la cerámica y preservar las propiedades del metal.

La adición de fibras de refuerzo metálicas en materiales de constitución cerámica demostró ser un mecanismo efectivo para la optimización de las propiedades mecánicas y de fractura de la matriz. La capacidad de absorción energética y tenacidad a la fractura medidas en la pasta de arcillas y alúmina utilizada, incremento a razón de: *absorción de energía* = $2.1667 + 4.8333x$, *tenacidad* = $2166.7 + 4833.3x$, en función de la cantidad de fibras en volumen, x , integrada. El coeficiente de correlación igual a 0.98, y el coeficiente de

determinación, r^2 , igual a 0.96, al ser muy cercanos a 1 demuestran la validez del modelo de análisis.

El incremento en la tenacidad al estar estrechamente relacionado con la resistencia a la tensión del material (Somiya, 2013) constituye la validación de la eficiencia del proceso desarrollado, ya que el objetivo es lograr cerámicas estructurales capaces de tomar de manera segura esfuerzos de cualquier clase, ya sea que exista compresión, tensión, torsión, o una combinación, al igual que evitar la fractura repentina y catastrófica producto de las tensiones inducidas por los cambios en los gradientes térmicos del ambiente o del material.

Al analizar las probetas IZOD tras el ensaye de impacto, observamos que ninguna fibra se fracturó, se hace necesario buscar mejorar la adherencia matriz y fibra, o lograr longitudes de fibras que permitan que se alcancen los esfuerzo de fluencia en las fibras.

En el ensaye de flexión pudimos observar dos cosas de gran interés. En primera instancia, en el compuesto cerámico reforzado pudieron determinarse de manera independiente la resistencia a la fractura por flexión, S_F , y la resistencia última a la flexión, S_U , situación que demuestra la estabilización de la fractura gracias a la adición de las fibras. En el material tradicional $S_F = S_U$, por lo tanto la fractura es inestable. En segundo lugar tanto la resistencia como el Módulo de Elasticidad tangente se determinaron superiores en el compuesto reforzado.

Las fibras de acero inoxidable fueron una opción de refuerzo adecuada, ya que el acero inoxidable preserva su integridad mecánica aun después de un tratamiento térmico de 850°C., la resistencia a la tensión media obtenida del ensaye superior a $7,000 \text{ kg/cm}^2$, pone de manifiesto la capacidad del acero inoxidable sobre otros acero aleados, y la ductilidad deseada como propiedad complementaria a la fragilidad de la matriz, se observó tanto en el Módulo de Elasticidad como en las fibras fracturadas vistas bajo el microscopio.

Como líneas de continuidad del trabajo se propone:

- I)** El desarrollo de nuevas pastas cerámicas a partir de mezclas antiplástico-arcilla.
- II)** Profundizar en el sistema TTT (tiempo, temperatura, transformación) para llegar al resultado de máxima sinergia metal-cerámica. Así como en la caracterización mecánica y termodinámica para producir información de diseño.
- III)** Profundizar en la influencia de la geometría de las piezas en la cantidad de refuerzo que puede incorporarse, así como procesos de producción con posibilidad de industrialización.
- IV)** El desarrollo de las piezas arquitectónicas y la definición de la geometría y proceso de ejecución óptimo. Utilizando herramientas como el análisis experimental de esfuerzos.
- V)** La elaboración de un plan de negocio que permita comercializar piezas producidas con materiales cerámicos reforzados como alternativa a las soluciones existentes.

Referencias

Libros

- Barsoum, M. (2003). Fundamentals of Ceramics. EUA Taylor and Francis.
- Basu, B. (2011). Advanced Structural Ceramics. EUA : Wiley.
- Beal, C. (1993). Masonry Design and Detailing. EUA: McGraww Hill.
- Belitskus, D. (1993). Fiber and Whisker Reinforced Ceramics for Structural Applications. EUA: Marcel Dekker.
- Callister, W. (2012). Fundamentals of Materials Science and Engineering. EUA: Wiley.
- Cardarelli, F. (2008). Materials Handbook. EUA: Springer.
- Carter, B. (2013). Ceramic Materials: Science and Engineering. EUA: Springer.
- Curtin, W. (2006). Structural Masonry Designers´Manual. Inglaterra: Blackwell Publishing.
- Curtin, W. (2006). Structural Masonry Designers´Manual. Inglaterra: Blackwell Publishing.
- Gallo, G. (2011). Diseño Estructural de Casas Habitación. México: McGraw Hill.
- González, J. (2005). Mecánica de Fractura. México: Limusa.
- Gueto, J. M. (2005). Tecnología de los Materiales Cerámicos. España: Díaz de Santos.
- Kelly, A. (2000). Comprehensive Composite Materials. ELSEVIER.
- Peschard, E. (1969). Resistencia de Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Puértolas, J. (2015). Tecnología de materiales. España: Sintesis.
- Somiya, S. (2013). Handbook of Advanced Ceramics. ELSEVIER.
- Schweitzer, P. (2003). Metallic Materias: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties. EUA: Marcel Dekker.

Vázquez, E. (2005). Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración. México: UNAM.

Wachtman, J. (2009). Mechanical Properties of Ceramics. EUA: Wiley.

Tesis

Almeida, C. (2013). Block machihembrado para mampostería confinada. México: UNAM.

Montero, A. (2013). Síntesis y caracterización de materiales electro-cerámicos libres de plomo tipo BCTZ. UNAM: IIM.

Parral, G. (2007). Influencia del espesor de la junta en las propiedades mecánicas de muros de mampostería de tabique. México: UNAM.

Vélez, J. (2006). El acero electrostático como refuerzo en estructuras de concreto: Un modelo de análisis sismo resistente. UNAM: PMDA.

Normas

Manual Handling Operation Regulations, Health and Safety Executive. Inglaterra: 2014.

Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012. (2012) Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C.

Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010. (2011) Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal. (2004). México: Gaceta Oficial del Distrito Federal.

E23-12c. Método estándar para prueba de impacto en barras indentadas. (2014). E.U.A.: ASTM.

C1341-13. Método estándar para prueba de las propiedades de compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras continuas sometidos a esfuerzos de flexión a temperatura ambiente. (2014). E.U.A.: ASTM.

Artículos

Biagiotti, J. (2008). A Review on Natural Fiber Based Composites. ELSEVIER: Journal of Natural Fibers.

Mojsilovic, N. (2011,). Tensile strenght of clay blocks: An experimental study. ELSEVIER: Construction and Bulding Materials .

Pemberton, S. (2010). The fracture energy of metal fiber reinforced ceramic composites (MFCs). ELSEVIER: Composites Science and Technology.

Hsien-Kuang, L. (2000). Impact response and mechanical behavior of 3-D ceramic matrix composites. ELSEVIER: Journal of European Ceramic Society.