



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.
Posgrado en Materiales Poliméricos

**DESARROLLO DE MATERIAL ESTRUCTURAL INTELIGENTE CON FIBRAS
DE CARBÓN Y MATRIZ CEMENTICIA.**

Tesis que presenta

M. en I. Carlos Emilio Vinajera Reyna

En opción al título de

DOCTOR EN MATERIALES POLIMÉRICOS

Mérida, Yucatán, México, Diciembre del 2009



Mérida, Yucatán, México; a 15 de diciembre de 2009

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Carlos E. Vinajera R.

M. en I. Carlos Emilio Vinajera Reyna



RECONOCIMIENTO

**Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis
titulado**

**DESARROLLO DE MATERIAL ESTRUCTURAL INTELIGENTE
CON FIBRAS DE CARBÓN Y MATRIZ CEMENTICIA**

**perteneciente al Programa de Doctorado en Materiales Poliméricos del
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. fue realizado en los
laboratorios de la Unidad de Materiales bajo la dirección del Dr. Pedro
Jesús Herrera Franco.**

Atentamente,

Dr. Oscar A. Moreno Valenzuela

Director Académico

Centro de Investigación Científica de Yucatán, AC.

DEDICATORIA

A mi familia: a mi esposa Rosa Isela

A mis hijos: Katia Isela, Marco Antonio, Jesús Isaac y Moisés Abraham.

A mis Padres: Armando Vinajera y Carmen Reyna (qepd).

A mi hermana Martha y familia.

Por todo su cariño.

A mis suegros: Santiago e Isela

Por su apoyo y presencia.

AGRADECIMIENTOS

Al director de la Tesis Dr. Pedro Jesús Herrera Franco, por las orientaciones para el desarrollo de la temática, así como para la realización de la investigación.

Al Ing. Javier Cauich por el apoyo para la realización de las pruebas de laboratorio en el CICY.

A la Unidad de Materiales del CICY, por las facilidades y apoyo otorgados de sus instalaciones para el desarrollo de este trabajo.

Al programa PRIORI de la Universidad Autónoma de Yucatán, por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de este trabajo.

Al CONACYT, por el apoyo económico parcial otorgado durante el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE GENERAL	I
LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS	X
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	
1.1. Introducción.	8
1.2. Materiales compuestos de matriz cementicia.	8
1.2.1. Tipos de cemento.	8
1.2.2. Tipos de mezclas con cemento Portland.	11
1.3. Concreto especializado: modificado con polímeros.	12
1.3.1. Normatividad.	12
1.3.2. Aplicaciones.	13
1.3.3. Tipos de polímeros.	14
1.3.4. Mecanismo de modificación.	15
1.4. Materiales cementicios fibro-reforzados.	15
1.4.1. Concreto especializado: refuerzo con fibras.	15
1.4.2. Nuevos desarrollos: materiales cementicios de alto desempeño.	20
1.4.3. Materiales cementicios reforzados con fibra de carbón.	20
1.4.4. Añadido de polímeros y fibras en materiales cementicios.	22

	Página
1.5. Resistencia a cortante de materiales cementicios.	22
1.6. Materiales inteligentes.	24
1.6.1. Definición.	24
1.6.2. Concreto inteligente.	25
1.7. Sistemas inteligentes y sensores.	26
1.7.1. Términos.	26
1.7.2. Centros de desarrollo.	27
1.7.3. Aplicaciones.	28
1.7.4. Sensores.	29

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción	30
2.2. Cortante puro.	30
2.3. Parámetros eléctricos.	32
2.4. Teoría de percolación.	33
2.5. Flujo eléctrico en materiales cementicios con partículas conductoras.	34
2.5.1. Introducción.	34
2.5.2. Resistividad eléctrica sin partículas conductoras.	35
2.5.3. Fibras conductoras en matriz cementicia.	38
2.6. Acoplamiento electromecánico: piezorresistividad.	39
2.6.1. Introducción.	39
2.6.2. Piezorresistividad.	40
2.6.3. Sensores piezorresistivos.	43
2.7. Comportamiento piezorresistivo de matriz cementicia con fibras.	44

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales.	48
3.1.1. Material compuesto cementicio.	48
3.1.2. Moldes para probetas.	49
3.1.3. Tintura de plata para conexión eléctrica probeta-conductores.	50
3.2. Equipos y accesorios.	50
3.2.1. Preparación de la mezcla.	50
3.2.2. Máquina universal.	50
3.2.3. Accesorio para prueba de cortante.	51
3.2.4. Resistividad y Resistencia eléctrica.	52
3.2.5. Microscopía.	52
3.2.6. Deformaciones.	53
3.3. Proporcionamiento y preparación de mezclas.	53
3.4. Procedimientos de medición y prueba.	54
3.4.1. Resistencia mecánica a cortante.	54
3.4.2. Resistencia mecánica a compresión simple.	55
3.4.3. Conductividad eléctrica en 3 ejes ortogonales.	55
3.4.4. Resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_0).	56
3.4.5. Acoplamiento esfuerzo cortante (τ)-resistencia eléctrica (R).	57
3.4.6. Análisis de fracturas.	58
3.4.7. Análisis de datos.	58

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comportamiento de material cementicio bajo cortante.	59
4.1.1. Esfuerzo cortante último (τ_u).	59
4.1.2. Comportamiento frágil y cuasi-dúctil de mezclas con y sin fibras.	64
4.1.3. Fractura por cortante.	68

	Página
4.2. Conductividad eléctrica de cemento con fibras de carbón	71
4.3. Variabilidad de la resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_o).	74
4.4. Evolución de la resistencia eléctrica y la carga de cortante.	78
4.4.1. Campo eléctrico E_1 y flujo a través del eje X_1 (régimen elasto-plástico).	78
4.4.2. Campo eléctrico E_1 y flujo a través del eje X_1 (hasta 300N, régimen elástico).	83
4.4.3. Campo eléctrico E_2 y flujo a través del eje X_2 (Hasta 300N, régimen elástico).	84
4.4.4. Campo eléctrico E_3 y flujo a través del eje X_3 (Hasta 300N, régimen elástico).	87
4.5. Acoplamiento piezorresistivo.	88
4.5.1. Piezorresistividad a través del eje X_1 hasta la fractura.	89
4.5.2. Coeficiente piezorresistivo del eje X_1 (hasta 300 N, régimen elástico).	93
4.5.3. Coeficiente piezorresistivo del eje X_2 (hasta 300 N, régimen elástico).	94
4.5.4. Coeficiente piezorresistivo del eje X_3 (hasta 300 N, régimen elástico).	95
4.5.5. Resumen de coeficientes de piezorresistividad (π_{ijkl}) en los 3 ejes.	96
4.5.6. Análisis del fenómeno piezorresistivo.	98
4.6. Resistencia a compresión (f_c) de las mezclas.	105
CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS	114

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1. Principales compuestos del cemento [4].	9
Tabla 1.2. Óxidos del cemento Pórtland [4].	10
Tabla 1.3. Propiedades físicas de varios tipos de látex [20].	14
Tabla 1.4. Propiedades de algunos látex para PPCC [13].	14
Tabla 2.1. Investigaciones de material cementicio con fibras de carbón	45
Tabla 3.1. Proporciones de las mezclas de cemento, en gramos.	54
Tabla 4.1 Esfuerzo promedio τ_u y módulo de cortante G.	62
Tabla 4.2. Correspondencia de zonas de R y N.	82
Tabla 4.3. Fracciones $(\Delta R/R_o)/(\Delta R/R_o)_{\text{fractura}}$	86
Tabla 4.4. Relación entre la parte reversible e irreversible R, eje X3.	88
Tabla 4.5. Polinomios de grado 9 para estimar $\Delta R/R$ en función de τ .	92
Tabla 4.6. Variación fraccional $\Delta R/R$ a la fractura.	93
Tabla 4.7. Coeficientes piezorresistivos de los ejes X_1 , X_2 y X_3 .	97
Tabla 4.8. Factores de galga.	98

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Comportamiento a flexión de vigas reforzadas con fibras: a) Suavisamiento por deformación; b) Endurecimiento por deformación [26, 34].	17
Figura 2.1. Porción de un sólido sometido a esfuerzo plano, σ_1 es cero.	31
Figura 2.2. Estado de cortante puro.	32
Figura 2.3. Intervalo de conductividad de Polímeros conjugados [68].	33
Figura 2.4. Esfuerzo cortante en el plano.	43
Figura 2.5. Galga extensométrica EA-06-125AC-350 VISHAY.	44
Figura 3.1. Probeta de pasta de cemento para prueba de cortante según ASTM D 5379 [59].	49
Figura 3.2. Molde de metal para elaborar moldes de silicón.	49
Figura 3.3. Molde de silicón para elaborar probetas de cemento.	49
Figura 3.4. Caucho de silicón para elaborar moldes.	50
Figura 3.5. Máquina universal SHIMADZU (CICY).	51
Figura 3.6. Accesorio para cortante según ASTM 5379 [59].	51
Figura 3.7. Equipo de medición de carga mecánica y resistencia eléctrica.	52
Figura 3.8. Microscopio electrónico de barrido (CICY).	53
Figura 3.9. Tres tipos de mezclas a base de cemento: P, L y F.	53
Figura 3.10. Probeta de cortante en accesorio de acuerdo al ASTM D 5379 [59].	55
Figura 3.11. Flujo eléctrico (E_i) en tres direcciones ortogonales: a) E_1 a través del eje X_1 en el centro; b) E_2 a través del eje X_2 en los extremos; c) E_3 a través del eje X_3 a través de las muescas.	56
Figura 3.12. Probeta con aplicación de flujo a través del eje X_2 , en los extremos.	57

Figura 4.1. Esfuerzo cortante (τ_u) de este estudio, de mezclas sin fibras y con 1% de fibras de carbón	61
Figura 4.2. Curvas de carga-desplazamiento vertical (valores extremos) de mezclas sin fibras (P y L) y con 1% de fibras de carbón con respecto a la masa de cemento (F).	65
Figura 4.3. Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical de la mezcla con 1% de fibras respecto a la masa de cemento (F) de este estudio.	66
Figura 4.4. Modelo tri-lineal para la mezcla con 1% de fibras de carbón (F) de este estudio.	67
Figura 4.5. Curvas experimental y de ajuste de una probeta de la mezcla con 1% de fibras de carbón de este estudio.	68
Figura 4.6. Grieta en probeta de mezcla sin fibras (L).	68
Figura 4.7. Grieta vertical de probeta con fibras de carbón de este estudio.	69
Figura 4.8. Micrografía obtenida en este estudio de zona de falla de pasta de cemento con 1% de fibras de carbón.	69
Figura 4.9. Micrografía de este estudio con 1% de fibra de carbón embebida en matriz cementicia.	70
Figura 4.10. Conductividad de cemento con fibras de carbón a través de tres ejes ortogonales. La línea horizontal indica la conductividad del germanio (1 S/m).	72
Figura 4.11. Conductividad eléctrica de componentes y de cemento con fibras.	73
Figura 4.12. Curva de percolación eléctrica de pasta de cemento (P), de cemento con látex (L) y fibras de carbón (% en masa) [99].	74
Figura 4.13. Promedios y variación de la resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_0) en cada uno de los ejes ortogonales, en dos mediciones durante 60 y 180 s.	75
Figura 4.14. Superficie de aplicación del flujo eléctrico en el eje X_1 .	75

Figura 4.15. Evolución de la resistencia eléctrica en la primera medición durante 180 segundos, eje X_1 .	76
Figura 4.16. Evolución de resistencia eléctrica de una probeta del eje X_1 , durante 180 s, en la primera medición.	77
Figura 4.17. Histograma de la resistencia eléctrica, de la probeta de la anterior, de la segunda medición durante 60 s.	78
Figura 4.18. Evolución de la resistencia eléctrica (R) y de la carga (N) de una probeta con flujo en el eje X_1 , con ajustes polinomiales de grado 9.	79
Figura 4.19. Evolución de las curvas R y N (a la falla).	81
Figura 4.20. Evolución de las curvas R y N para flujo en X_1 (a la falla).	82
Figura 4.21. Evolución de R y N (hasta 300 N), flujo a través de X_1 .	83
Figura 4.22. Evolución de las curvas R y N (hasta 300 N), flujo a través de X_1 .	84
Figura 4.23. Evolución de las curvas R y N de probeta con flujo a través de X_2 .	85
Figura 4.24. Evolución de las curvas R y N de una probeta muy inestable.	85
Figura 4.25. Evolución de las curvas R y N, de flujo a través del eje X_3 .	87
Figura 4.26. Evolución de las curvas R y N, de otra prueba a través del eje X_3 .	88
Figura 4.27. Correlación entre el esfuerzo τ y el cambio fraccional $\Delta R/R$ en prueba sometida a campo eléctrico E_1 en el eje X_1 a la falla.	90
Figura 4.28. Correlación entre τ y $\Delta R/R$ de una prueba con flujo en el eje X_1 .	90
Figura 4.29. Ajuste polinomial entre τ y $\Delta R/R$ hasta τ_u de la Figura 4.28.	91
Figura 4.30. Mejor ajuste lineal de una probeta con flujo eléctrico a través del eje X_1 hasta 300 N.	94
Figura 4.31. Mejor ajuste lineal para flujo eléctrico a través del eje X_2 hasta 300N.	95

	Página
Figura 4.32. Relación entre el esfuerzo cortante y la variación fraccional con flujo en el eje X_3 .	96
Figura 4.33. Coeficientes de piezorresistividad de los ejes X_1 , X_2 y X_3 .	97
Figura 4.34. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos de flexión del método losipescu.	102
Figura 4.35. Distribución de deformaciones por cortante ε_{xy} en probetas losipescu obtenida mediante técnica óptica, en material compuesto con refuerzo horizontal, fibra de carbón/resina polimérica [100].	103
Figura 4.36. Distribución de deformaciones por cortante ε_{xy} en probetas losipescu obtenida mediante técnica óptica, en material compuesto con refuerzo vertical, fibra de carbón/resina polimérica [100].	104
Figura 4.37. Resistencia a compresión de las mezclas P, L y F.	106
Figura 4.38. Resistencia al esfuerzo cortante τ y compresión f_c .	107
Figura 4.39. Curvas esfuerzo-deformación mezcla Fc (probetas sección cuadrada)	107

LISTA DE ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
AE	Acoustic Emission
ASTM	American Standard for Testing and Materials
CHIPS	Centre for Intelligent High Performance Structures
CIMSS	Center for Intelligent Materials Systems and Structures
C	Concreto
CBM	Cement Based Materials
CFRC	Carbon Fiber Reinforced Concrete
CP	Cemento Pórtland
CSA	Canadian Standard Association
FRP	Fiber Reinforced Polymers
IMCYC	Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto
HPFRCC	High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites
ITZ	Interphase Zone
LCPC	Laboratoire de Ponts et Chaussées
LMC	Latex Modified Concrete
M	Mortero
MSFRCC	Multi-Scale Fiber Reinforced Cement Composites
PAN	Polyacrylonitrile
PVA	Polyvinyl-Acetate
P	Pasta
PPCC	Polymer Portland Cement Concrete
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction
SEM	Scanning Electronic Microscopy
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene
SHM	Structural Health Monitoring

RESUMEN

La presente tesis explora el comportamiento estructural y piezorresistivo de un material compuesto cementicio reforzado con fibras de carbón, sometido a fuerzas de cortante y flujo eléctrico en tres direcciones ortogonales. La prueba de cortante se realizó con base a la norma del ASTM (D5379) para material compuesto, aplicada en mezclas de cemento con y sin fibras. Se utilizaron fibras de carbón cortas de tipo PAN distribuidas aleatoriamente en la mezcla. También se estudió el efecto de la utilización de una emulsión polimérica. El comportamiento piezorresistivo fue determinado mediante la aplicación de una carga mecánica y la medición de la resistencia eléctrica de manera simultánea, tanto para el comportamiento elástico, como para el plástico. Comparado con la mezcla sin fibras, el promedio de la resistencia al cortante del material compuesto con fibras fue 4 veces mayor, presentó un comportamiento más dúctil y una mayor tenacidad, en contraste el material sin fibras fue frágil. El comportamiento piezorresistivo bajo cargas de cortante en la zona elástica (40% esfuerzo último) presentó una relación directa entre el esfuerzo y el cambio fraccional de la resistencia eléctrica; en la descarga la resistencia eléctrica disminuyó (sin recuperar su valor inicial). En la zona plástica, después del esfuerzo máximo, la resistencia eléctrica tuvo grandes aumentos por la aparición de grietas. Tres coeficientes piezorresistivos fueron determinados en la zona elástica en direcciones ortogonales, el valor máximo fue a través del eje X_1 , los otros dos coeficientes de ejes donde hay variaciones del cortante y signo tuvieron resultados similares. Todos los Factores de galga obtenidos en este estudio, fueron menores que los de tensión y compresión reportados en la literatura.

ABSTRACT

This thesis explores the structural and piezoresistive behavior of a fiber reinforced cementitious composite subjected to shear and electrical flux along three orthogonal directions. The testing was carried out according to ASTM D-5379 method for composites; it was used on specimens with and without fibers. Randomly distributed short PAN-based carbon fibers were used. A third composition that was tested contained a copolymer emulsion and the behavior under shear loads was also studied. The piezoresistive behavior was determined by simultaneous measurement of the mechanical behavior and the ensuing electrical resistance, for both, elastic and plastic regimes of load. The mixture with fibers showed an average shear strength four times higher than the strengths measured for the other two formulations; it also presented a more ductile behavior and higher toughness; the mixture without fibers presented a brittle behavior. The piezoresistive behavior under shear loads in the elastic regime (40% ultimate shear stress) exhibited a direct relationship between the applied shear stress and the fractional change of electrical resistance. However, when the specimen was unloaded the electrical resistance decreased but did not recuperate its original value. In the plastic regime, after the maximum shear stress the electrical resistance increased highly, due to the crack formation. Three piezoresistive coefficients were determined in orthogonal directions in the elastic regime. The maximum value was found for the through-thickness axis X_1 . The coefficients corresponding to the other two orthogonal axes where there are load variations and changes of signs had similar results. All the gage factors obtained herein were lower than tensile and compressive ones reported in the literature.

INTRODUCCIÓN.

La adición de fibras en materiales frágiles, como los cerámicos, mejora varias propiedades mecánicas y cambia el tipo de falla de frágil a uno más dúctil. Los materiales cerámicos entre los que se encuentra el cemento Pórtland presentan un comportamiento mecánico mejor bajo cargas de flexión, tensión, impacto y cortante por el añadido de fibras. Adicionalmente a la mejora mecánica, las fibras en toda la masa del material disminuyen el ancho de grietas por efectos de contracción durante la hidratación, esto reduce la permeabilidad a los gases y a la humedad, y como consecuencia mejora la durabilidad. La inclusión de fibras en el concreto inició en los años sesentas, e inicialmente se usaron fibras de acero rectas y posteriormente fibras poliméricas, principalmente de polipropileno, con el fin de evitar la contracción. En los años ochentas, Japón inicia el uso masivo de concreto con fibras de carbón en la construcción de rascacielos con el enfoque estructural y de durabilidad [1]; en parte por el costo de la fibra de carbón el uso de este tipo de concreto no ha sido tan difundido en el resto del mundo. En los años ochentas en Estados Unidos se creó el Comité 544 del ACI (American Concrete Institute) para fibras de acero en concreto, con temáticas sobre: elaboración de la mezcla y trabajabilidad, pruebas de caracterización, etc., basadas en normas de concreto. A pesar de que la Tecnología del concreto tiene más de 100 años, en la actualidad ni el ACI, ni el ASTM han publicado normas para la caracterización de materiales cementicios sometidos a cargas de tensión directa o de cortante; la caracterización de estos materiales se ha basado en la mayoría de los casos en la prueba de compresión; únicamente el Japón emitió normas para tensión y cortante (JSCE-6) recientemente. El estudio de elementos estructurales bajo fuerzas de

cortante es muy importante, debido a las fallas estructurales causadas principalmente por cargas accidentales sobre todo de origen sísmico. La estimación de la resistencia al cortante en reglamentos de Estados Unidos, Canadá, Australia y México se basa en el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión de cilindros de concreto a veintiocho días de fraguado. Por otra parte, en los años sesentas losipescu propuso un método para la determinación del cortante de materiales metálicos; en 1994 dicho método fue adoptado por el ASTM para Materiales compuestos como la norma D 5379. Este estudio explora la posible aplicación de esta norma para el desarrollo de materiales con potencial de ser usados como sensores para su aplicación en estructuras de materiales cementicios con y sin fibras, con el fin de poder cuantificar la resistencia.

Por otra parte, debido a la necesidad de edificios con características de aislamiento electromagnético y a nuevas tecnologías de evaluación del concreto basadas en las propiedades electromagnéticas, los estudios de las propiedades eléctricas de los materiales cementicios han estado aumentando en las dos últimas décadas. La adición de fibras o partículas conductoras en la masa de cemento aumenta la conductividad eléctrica y produce aislamiento electromagnético [2]. Además, este concreto semiconductor ha generado nuevas aplicaciones, como el “concreto conductor” que sirve para derretir nieve en carreteras.

En los últimos años se ha estado desarrollando una tecnología emergente basada en la piezorresistividad de los materiales cementicios. La adición de fibras conductoras, además de producir mejoras mecánicas y de durabilidad, también produce un comportamiento sensor o piezorresistivo que ha sido denominado "concreto inteligente". Una patente se registró en Estados Unidos en 1998 por parte de la Universidad de Nueva York [3].

La piezorresistividad ha sido estudiada principalmente bajo cargas mecánicas de tensión directa, compresión simple y flexión [2], pero no ha sido reportada bajo fuerzas de cortante. El gran interés de esta temática se debe a la posibilidad de integrar esta tecnología a sistemas de monitoreo estructural de la infraestructura urbana.

La infraestructura urbana es la parte más costosa de las ciudades de todos los países, con el paso del tiempo, el riesgo de fallas catastróficas aumenta. Este tema ha sido planteado en diversos foros en el mundo, las causas de las fallas se deben a problemas de envejecimiento y deterioro prematuro de las estructuras. Actualmente se están registrando fallas en diversas estructuras en varias partes del mundo, por tanto, existe la urgente necesidad de diagnosticar el estado estructural de los sistemas de manera continua y sistemática. Estados Unidos, Canadá, Japón, China y Europa están desarrollando sistemas para diagnosticar el estado de las estructuras; una denominación para esta actividad ha sido "Monitoreo de la Salud estructural" (SHM por sus siglas en inglés).

Lo anterior indica la necesidad de contar con sistemas que puedan ser utilizados como sensores para el monitoreo y diagnóstico de estructuras. Por lo tanto, en este estudio se explora el comportamiento de un material que podría ser utilizado en la fabricación de sensores con material cementicio y fibras de carbón para el seguimiento de cargas de cortante. Esto permitiría lograr una mayor durabilidad en dichas estructuras.

Esta tesis proporciona otro método para la determinación del esfuerzo cortante último en materiales cementicios, principalmente para los reforzados con fibras; por otra parte, amplía el conocimiento sobre el comportamiento piezorresistivo de los materiales cementicios, ya que estudia el fenómeno con aplicación de fuerza cortante, como resultado reporta coeficientes piezorresistivos bajo este tipo de carga mecánica.

Esta tesis está dividida en cuatro capítulos. El primer capítulo expone los antecedentes del tema. El capítulo dos, contiene la teoría que soporta la temática. El capítulo tres enuncia los materiales, los equipos y los métodos utilizados. Finalmente el capítulo cuatro, contiene el análisis de resultados y la discusión. Al final se dan las conclusiones y los posibles desarrollos futuros para ampliar la temática propuesta.

OBJETIVO GENERAL.

Evaluar el comportamiento mecánico y piezorresistivo de un material compuesto de tipo cementicio con emulsión polimérica y reforzado con fibras de carbón, sometido a fuerzas de cortante y flujo eléctrico aplicado en cada uno de tres direcciones ortogonales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Mecánicos.

Determinar la resistencia a cortante, de mezclas de cemento con y sin fibras de carbón.

Analizar la relación entre la resistencia a cortante y la compresión simple de mezclas con fibras de carbón.

Determinar el Módulo de cortante de mezclas con y sin fibras de carbón.

Eléctricos.

Determinar la conductividad eléctrica del material compuesto con fibras de carbón.

Piezorresistivos.

Determinar los coeficientes de piezorresistividad eléctrica en tres direcciones ortogonales de flujo eléctrico, bajo fuerzas de cortante en el régimen elástico.

Estudiar el comportamiento piezorresistivo bajo cortante en el régimen elástico.

Estudiar el comportamiento piezorresistivo en el régimen plástico bajo fuerzas de cortante.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

1.1. Introducción.

En este capítulo se tratan los siguientes temas: 1) Materiales compuestos de matriz cementicia; 2) Concretos especializados (modificados con polímeros y reforzados con fibras); (3) Materiales inteligentes y Sistemas inteligentes. El concreto es un material compuesto que ha sido usado durante siglos; la aparición del cemento Pórtland, marcó un punto de referencia en la Industria de la construcción; este material ha sido usado de manera masiva en todo el mundo, pero ha presentado diversos problemas mecánicos y de durabilidad, debido a su carácter frágil y poroso. Varias instituciones han editado normas sobre la Tecnología del concreto, principalmente: el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) y el Instituto Americano de Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés). Por otra parte, la aplicación de polímeros en los materiales cementicios propició la aparición de concretos especializados (modificados con polímeros y reforzados con fibras) normados por los Comités 548 y 544 del ACI, respectivamente. Las ventajas mecánicas y de durabilidad de las fibras de carbón en materiales cementicios propiciaron su uso de manera masiva en edificios en algunos países, principalmente Japón, además propició un nuevo enfoque: el comportamiento inteligente o comportamiento sensor (acoplamiento electromecánico). El comportamiento inteligente del material cementicio con fibras es actualmente una tecnología emergente, que proporciona la oportunidad de integrar este material como un sensor, para el monitoreo de la Salud estructural de la infraestructura (SHM por sus siglas en inglés).

1.2. Materiales compuestos de matriz cementicia.

1.2.1. Tipos de cemento.

De acuerdo a Neville los cementos hidráulicos están formados principalmente por silicatos y aluminatos de calcio. Suelen clasificarse como: cementos naturales, cementos Pórtland y cementos aluminosos. El prototipo del cemento moderno fue obtenido por Isaac Johnson en 1845. Las Normas británicas (British Standard

BS12:1958) definen el cemento Pórtland como: “mezcla de materiales calcáreos, arcillas y otros materiales que contienen sílice, alúmina y óxidos de hierro que se queman a la temperatura de formación de clinkers” [4]. Según Skalny, el cemento Pórtland fue patentado en 1824 por Joseph Aspdin un constructor de Leeds, con el número de patente 5022, titulada “Una mejora en el modo de producir piedra artificial” [5]. Por el volumen de producción anual, el cemento Pórtland ha sido uno de los materiales aglutinantes más importantes en el mundo para la elaboración de concreto, por sus características mecánicas, físicas y su bajo costo comparado con otros aglutinantes. El desarrollo de nuevos materiales denominados “materiales a base de cemento” (CBM por sus siglas en inglés) o materiales cementicios es creciente.

Perumalsamy y Shah señalaron la importancia de la composición de la microestructura del cemento Pórtland en las propiedades del material compuesto; la pasta de cemento endurecida es un sólido que contiene poros de diversos tamaños, su microestructura exhibe cambios volumétricos significativos, por los fenómenos de cedencia y contracción, por migración de la humedad [6]. La microestructura depende de los componentes del cemento. Neville reportó 4 compuestos principales del cemento Pórtland (Tabla 1.1) y óxidos predominantes (Tabla 1.2) [4]. Chung reportó que el cemento Pórtland está formado por silicatos (tetraedros con un átomo de silicón en el centro y átomos de oxígeno en las esquinas). Por la presencia de iones Ca^{2+} el cemento es alcalino [2].

Tabla 1.1. Principales compuestos del cemento [4].

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 1.2. Óxidos del cemento Pórtland [4].

Óxido	%
CaO	63
SiO ₂	20
Al ₂ O ₃	6
Fe ₂ O ₃	3
MgO	1,5
SO ₃	2

Perumalsamy y Shah reportaron que los Silicatos de calcio hidratados (C-S-H) tienen una estructura cristalina pobre; se modelan como placas apiladas en orden aleatorio, con espaciamentos de aproximadamente 11 Angstrom; es posible que exista agua entre las placas. Los silicatos tienen una gran área superficial (200 m²/g). El enlace entre las láminas de los silicatos crea su resistencia. El hidróxido de calcio (CH) producto de la hidratación de los silicatos de calcio consiste en grandes cristales hexagonales que miden entre 0,20-1,00 µm. Existe una red de poros en el cemento, los poros grandes se denominan capilares [6].

Stutzman realizó estudios microscópicos del concreto e identificó los principales componentes que se presentan durante la hidratación del cemento: silicatos (CSH) y el hidróxido de calcio (CH). Dos tipos de láminas de los silicatos fueron observadas: láminas en forma de pequeños racimos (tipo I); y placas (tipo II). Placas hexagonales de hidróxido de calcio fueron observadas, que ocupan hasta el 12% del volumen. Etringita en forma de agujas fue observada. Mediante microscopía electrónica (SEM por sus siglas en inglés) se pueden cuantificar fases en la interfase cemento-agregado. Alta porosidad cerca del agregado fue observada, que disminuye al alejarse del agregado, en contraste el gel C-S-H aumenta [7]. Abyaneh *et al.*, aplicando microscopía electrónica en concreto (en el contexto de la Teoría de endurecimiento de materiales cementicios) observaron que transcurridos 14 días de curado aparecen: una fase de una dimensión (en

forma de aguja); y regiones de remoción de partículas (esto ocurre cuando la fuerza cortante aplicada en las partículas es más grande que la resistencia de adherencia entre la partícula y su capa) [8].

1.2.2. Tipos de mezclas con cemento Pórtland.

El material compuesto (MC) de matriz cementicia más importante es el concreto (C). Metha con base en el ASTM C 125 y al Comité 116 del ACI definió al concreto: "material compuesto que consiste en un medio aglutinante en el que están embebidas partículas o fragmentos de agregados; en el concreto de cemento hidráulico, el aglutinante se forma con la mezcla de cemento y agua" [9]. La mezcla de material cementicio con agregados finos y agua se denomina "mortero" (M) y la mezcla con sólo cemento y agua "pasta" (P).

Malier en su artículo sobre la historia del concreto señaló que Smeaton en 1756, Vicat en 1818 y Aspdin en 1825 contribuyeron a inventar el concreto moderno; Monier y Lambot en 1848, Coignet en 1852 y Hennebique en 1880 usaron concreto reforzado en edificios. Durante casi un siglo el concreto permaneció sin cambios; pero en los ochentas se demostró el efecto dañino del agua en exceso (no hidratada) que afecta la resistencia mecánica y la durabilidad; desde entonces los retos han sido la reducción de la cantidad de agua y la elaboración de mezclas compactas. En las últimas décadas surgió el "concreto de alto desempeño" (HPC por sus siglas en inglés) que para mejorar el comportamiento, ha usado plastificantes para la defloculación y aditivos para lograr una mejor distribución de los granos del cemento [10].

El concreto hidráulico simple con cemento Pórtland posee una alta resistencia a compresión, pero baja resistencia a tensión, debido a este problema, surgió el concepto de reforzamiento. Wang y Salmon en su tratado de concreto reforzado, señalaron que en París en 1867 Joseph Monier colocó varillas de acero embebidas en concreto, fue el primero en darle un uso práctico al concreto

reforzado; en Estados Unidos, Thaddeous Hyatt realizó experimentos con vigas de concreto reforzadas con varillas de acero [11].

1.3. Concreto especializado: modificado con polímeros.

1.3.1. Normatividad.

El “concreto modificado con polímeros” es considerado un concreto especializado según el ASTM STP 169C [12]. De acuerdo al ACI 548.1R-86 (guía para el uso de polímeros en concreto): “el concreto modificado con polímeros es un concreto con polímero soluble en agua o como emulsión, añadido a la mezcla durante la preparación, para modificar las características del concreto endurecido” [13]. Metha señaló que en el concreto modificado con látex (LMC por sus siglas en inglés), también conocido como concreto con cemento Pórtland y polímeros (PPCC por sus siglas en inglés) se reemplaza una parte del agua de la mezcla con látex (emulsión polimérica) [9]. En esta tesis se maneja principalmente el término LMC.

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) de acuerdo a las normas ASTM C-125 y ACI-SP19 definió aditivo como “un material diferente al agua, a los agregados y al cemento; usado como componente del concreto o mortero y colocado durante la mezcla”, se excluyen las fibras y polímeros en el concreto, éstos son normados por los Comités del ACI 548 (polímeros) y 544 (fibras en concreto) [14].

Dikeou comparó un concreto normal con un concreto modificado con polímeros (PPCC); señaló que el ACI estableció el Comité 548 para polímeros en concreto en 1971 y publicó el SP-40 en 1973. Los cambios reportados fueron: 1) la resistencia a compresión del concreto normal fue 35,0 MPa y el PPCC tuvo 38,5 MPa; 2) la tensión del concreto normal fue 2,45 MPa y el PPCC tuvo 5,60 MPa; 3) el Módulo de elasticidad a compresión del concreto normal fue de 24,5 MPa y el PPCC tuvo 14,0 MPa; 4) la absorción del concreto normal fue 5,5% y el PPCC tuvo 0% o material impermeable. Dikeou señaló que el PPCC se usó en los años

cincuentas, inicialmente como mortero más que concreto, como sobre-capa en pisos industriales y paneles prefabricados [15]. El PPCC presentó mayores resistencias a compresión y tensión que el concreto normal; tuvo disminución del Módulo de elasticidad a compresión; y resultó impermeable.

Yun *et al.*, estudiaron el sistema de micro-vacíos de aire y su influencia en la permeabilidad de concreto modificado con látex, con cemento Pórtland y cementos de alta resistencia temprana [16]. Wang *et al.*, estudiaron propiedades físicas y mecánicas de morteros con emulsión de hule estireno-butadieno (SBR por sus siglas en inglés) [17]. Odler y Liang, estudiaron las propiedades y el desarrollo de la microestructura de pastas de cemento modificadas con un copolímero estireno-butadieno; observaron que el polímero se distribuye como una red tridimensional continua, combinada con los productos de hidratación del cemento [18]. Colak, estudió propiedades de pastas de cemento modificadas con látex, con y sin superfluidificantes [19].

1.3.2. Aplicaciones.

Según Kuhlmann y O'Brian una de las primeras experiencias de mortero con polímeros se llevó a cabo en 1957 como una capa experimental de 12,7 mm de espesor sobre una losa de un puente en Cheboygan, Chicago para prolongar la vida de la superficie de rodamiento [20]. Cady *et al.*, reportaron tratamientos de losas de puentes con sobrecapas de LMC [21]. Sawada reportó un método de reparación y prevención de daño, para estructuras de concreto desarrollado en Japón. El sistema se basó en mortero de cemento con polímero a base de estireno-butadieno y una película de hule acrílico, para proteger nuevas estructuras y reparar aquellas degradadas por el ingreso de iones cloruro [22]. Una investigación llevada a cabo en el CICY usó látex (15% en volumen) en mortero de cemento para mejorar la resistencia a compresión; el látex (SBR) fue del Centro de Investigación y Desarrollo del Grupo Industrial Resistol S.A. de C.V; se obtuvo un incremento de la resistencia a compresión del 16% (de 138 a 161 kg/cm²) y un cambio en el modo de falla (de catastrófico a uno de cedencia) [23].

1.3.3. Tipos de polímeros.

La Tabla 1.3 presenta propiedades de tipos de látex según el ASTM STP 169C reportadas por Kuhlmann y O'Brian. El látex es una dispersión de pequeñas partículas poliméricas orgánicas en agua, las cuales son de forma esférica con diámetro entre 0,05 y 0,50 μm . Se fabrica mediante el proceso de polimerización por emulsión. Los látex acrílicos resisten la radiación ultravioleta [20]. La Tabla 1.4 presenta un reporte del ACI 548.1R sobre varios tipos de látex [13].

Tabla 1.3. Propiedades físicas de varios tipos de látex [20].

Tipo de látex	Acrónimo	Sólidos, %	Viscosidad, cps	Ph
Estireno-butadieno	SB	47	20 a 50	9 a 11
Copolímeros acrílicos	PAE	47	20 a 100	9 a 10
Copolímeros estireno-acrílicos	SA	48	75 a 5000	6 a 9
Acetato de polivinílico	PVA	55	1000 a 2500	4 a 5
Acetato-etileno vinílico	VAE	55	500 a 2500	5 a 6

Tabla 1.4. Propiedades de algunos látex para PPCC [13].

Tipo de polímero	Polivinil-acetato	Estireno-butadieno	Acrílico	Neopreno
Acrónimo	PVA	SB		
Sólidos, %	50	48	46	42
Tipo de estabilizador	No-iónico	No-iónico	No-iónico	No-iónico
Gravedad específica, 26°C	1,09	1,01	1,05	1,10
pH	2,5	10,0	9,5	9,0
Tamaño de partícula, nm		200		
Tensión superficial, dina/cm ²		32	40	40
Viscosidad, cps (a 20°C)	17	24	250	10

Nota: Tensión superficial en dina/cm² (0,1 Pa) a 25°C.

1.3.4. Mecanismo de modificación.

Según Kuhlmann y O'Brian la modificación del cemento Pórtland involucra dos procesos: la hidratación del cemento y la coalescencia del látex; la hidratación es igual que en concreto normal, pero mientras ésta se lleva a cabo, las partículas de látex se concentran y puentean [20].

1.4. Materiales cementicios fibro-reforzados.

1.4.1. Concreto especializado: refuerzo con fibras.

El concreto reforzado con fibras, al igual que el LMC, es considerado un concreto especializado según el ASTM STP 169C [12]. El Comité 544 del ACI norma sobre fibras en concreto, este comité afirma que el refuerzo de materiales con fibras no es un concepto nuevo, se ha aplicado desde tiempos antiguos, la Biblia narra el uso de fibras vegetales para elaborar ladrillos de barro; el ACI 544.1R-82 [24] trata sobre el estado del arte del concreto reforzado con fibras. Bentur señaló los problemas de fragilidad y la baja resistencia a tensión del cemento Pórtland, como consecuencia es necesario el refuerzo; el refuerzo convencional ha sido con barras de acero en las zonas de tensión y cortante; en las últimas décadas se han estado usando fibras en "elementos ligeros" de mortero de 20 mm de espesor y en "elementos voluminosos" de concreto. Se han usado fibras de acero (generalmente para concreto), de vidrio (para láminas delgadas entre 10 y 20 mm), fibras de asbesto y fibras orgánicas (naturales o sintéticas) [25].

Johnston en el ASTM STP 169C sobre el uso de fibras de acero en el concreto señaló varios puntos: 1) las fibras reducen la trabajabilidad de la mezcla (puede medirse de acuerdo a la norma ASTM C995 con cono invertido); 2) el contenido de fibras de acero y su uniformidad en concreto endurecido pueden determinarse con técnicas electromagnéticas estandarizadas; la orientación y la uniformidad de las fibras se han estudiado con radiografía de rayos X; para determinar el contenido de fibras de vidrio se ha usado espectrometría de fluorescencia de rayos X; 3) las fibras distribuyen mejor las grietas y reducen sus anchos; 4) porcentajes menores al 1% (porcentaje normal) tiene poco efecto en el comportamiento mecánico; 5) el

microagrietamiento se presenta debido a cargas mecánicas a “niveles característicos de carga y deformación”, cuando las microgrietas son muy significativas en continuidad, visibilidad, longitud y ancho, se convierten en macrogrietas; estudios de “emisión acústica” (AE por sus siglas en inglés) confirman que el máximo evento acústico corresponde muy cercanamente a los “niveles característicos de carga y deformación”, esta condición se define como “primera grieta” y es claramente identificable en tensión directa y en flexión por la reducción de la rigidez, para carga de compresión la “primera grieta” no es fácilmente identificable; 6) las pruebas de durabilidad no han sido estandarizadas para concreto reforzado con fibras [26].

Sobre el uso de fibras en concreto Perumalsamy y Shah señalaron que su utilización comenzó en los años sesentas, al principio fibras rectas de acero fueron usadas. Las fibras poliméricas comenzaron a usarse en 1965, pero su uso a gran escala comenzó en los años setentas, principalmente para el control del agrietamiento del concreto fresco; fibras de polipropileno (PP), nylon, poliéster, polietileno (PE) y celulosa fueron usadas. Para mejorar las propiedades del concreto endurecido se usan volúmenes grandes de fibras [6].

Múltiples estudios sobre materiales cementicios reforzados con fibras han sido realizados. Ouyang y Shah estudiaron el endurecimiento por deformación y la tenacidad de matriz cementicia de alta resistencia reforzada con fibras cortas usando mecánica de la fractura no lineal; señalaron que los materiales cementicios de alta resistencia son más frágiles que los convencionales, pero la fragilidad puede reducirse con fibras [27]. Illston reportó que el asbesto-cemento tiene normas internacionales; pero el uso del asbesto ha sido restringido debido a los problemas de salud que causa su manejo [28]. Chen y Chung realizaron un estudio comparativo entre fibras de carbón, de polietileno (PE) y de acero en concreto y su mejoramiento por la adición de látex [29]; un estudio similar realizó Banthia *et al.*, con fibras de carbón, acero y polipropileno (PP), inclusive en formas híbridas, en probetas sometidas a tensión directa [30]. Bayasi y McIntyre

estudiaron el efecto del añadido de manojos de fibras de polipropileno (PP) formando una red, para evitar el agrietamiento por contracción plástica [31]. Li *et al.*, señalaron que los problemas de deterioro y fallas en la infraestructura se deben al agrietamiento y a la naturaleza frágil del concreto; los estudios se han enfocado a mejorar la ductilidad del concreto, y la manera más efectiva ha sido el refuerzo con fibras [32]. Xu y Chung lograron un mejoramiento en el comportamiento mecánico por medio de un tratamiento superficial de las fibras [33].

El ASTM C1018-97 es un método para determinar la tenacidad a flexión y la resistencia en la “primera grieta” (caracterizada por el cambio de pendiente o disminución de la rigidez) en base a la gráfica carga-deflexión de vigas de concreto reforzadas con fibras, con cargas concentradas en los tercios. La Figura 1.1 muestra la gráfica carga-deflexión señalando la “primera grieta” y los comportamientos de “suavizamiento por deformación” (o disminución abrupta de la carga después de su valor máximo; la primera grieta y la carga última están casi en el mismo nivel) y el “endurecimiento por deformación” (o aumento de la carga después de la primera grieta, hasta un valor último) [26,34].

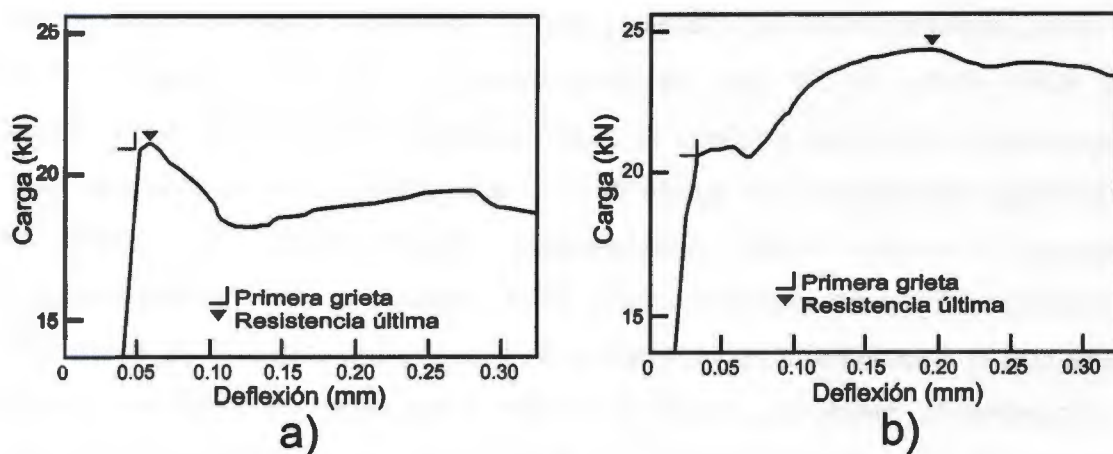


Figura 1.1. Comportamiento a flexión de vigas reforzadas con fibras: a) Suavizamiento por deformación; b) Endurecimiento por deformación [26, 34].

Perumalsamy y Shah señalaron que la principal contribución de las fibras en aplicaciones estructurales es en la ductilidad, en tres modos de carga: flexión, cortante y torsión; pero la estimación de la ductilidad y su incorporación al diseño no ha sido establecida. Bajo tensión axial, la porción lineal de la curva esfuerzo-deformación se presenta aproximadamente hasta el 80% de la resistencia última. La ley de mezclas fue usada en los primeros estudios para modelar el comportamiento del material compuesto reforzado con fibras, pero es necesario considerar la fracción de volumen de la fibra y la relación largo/diámetro (L/D). Los modelos analíticos se basan en: 1) la Teoría de fractura múltiple; 2) en modelos de materiales compuestos; 3) modelos de liberación de esfuerzo; 4) modelos de mecánica de la fractura; 5) modelos de mecánica interfacial; y 6) modelos micromecánicos. La mecánica de la fractura y la interfacial son adecuadas para analizar el proceso inelástico del concreto reforzado con fibras. Los parámetros que afectan la interacción fibra-matriz son: 1) composición de la matriz; 2) geometría de la fibra; 3) tipo de fibra; 4) características superficiales de la fibra; 5) rigidez de la fibra respecto a la matriz; 6) orientación de las fibras (alineadas o aleatorias); 7) fracción de volumen de fibras; 8) rapidez de aplicación de la carga; 9) durabilidad de la fibra. La zona interfacial abarca hasta 50 μm alrededor de la fibra. La interfase tiene doble filme (rugoso) entre 1 y 2 μm de espesor alrededor de la fibra. La interfase es muy porosa y rica en grandes cristales de hidróxido de calcio (CH) hasta de 30 μm . La contribución de la zona interfacial en el comportamiento mecánico se debe al desprendimiento y extracción de las fibras. Una interfase débil desvía una grieta de la matriz cuando se aproxima a la fibra, mecanismo conocido como agrietamiento "Cook-Gordon". En fibras de polipropileno (PP) y de polivinil-acetato (PVA), debido a que no hay reacción química con la microestructura inorgánica de la pasta de cemento, la interacción es principalmente mecánica, se ha reportado adherencia de 1 MPa. Una alta resistencia de unión en la interfase no garantiza un mejor comportamiento del material compuesto [6]. Cross *et al.*, realizó pruebas de microdureza en pasta de cemento con fibras; reportó una dureza de la pasta de 542 MPa en la zona de interfase fibra-matriz (ITZ por sus siglas en inglés) entre 40 y 65 μm de la fibra; y

de 393 MPa a 40 μm de la fibra; alrededor de la fibra no se pudo evaluar la dureza [35]. Naaman y Najm estudiaron el mecanismo de deslizamiento de fibras de acero en concreto mediante pruebas de extracción; con tres tipos de fibras y tres niveles de resistencia de la matriz; usaron látex, ceniza volante y microsilica [36]. Fu y Chung estudiaron metilcelulosa y látex añadidos a la mezcla de concreto, para mejorar la adherencia entre el concreto y la superficie de varillas de acero, fibras de acero y de carbón; obtuvieron una correlación entre la “resistividad eléctrica de contacto” y la adherencia, se cumplió que a mayor adherencia, mayor resistividad [37]. Pochanart y Harmon desarrollaron un modelo de adherencia y deslizamiento de la varilla de refuerzo en concreto reforzado [38].

Li *et al.*, reportaron “endurecimiento por deformación” en material cementicio (ECC por sus siglas en inglés) con fibras polivinil-acetato; éstas se rompen en lugar de presentar el mecanismo de extracción, por dos razones: 1) la fuerte unión química de los hidratos de cemento con la fibra; 2) por el endurecimiento al deslizamiento durante la extracción. Un modelo micromecánico sugirió la reducción de la adhesión fibra-matriz, entonces, se trataron las fibras con varios niveles de un aceite que reduce la capacidad hidrofílica con la superficie de la fibra [32].

Perumalsamy y Shah sobre la adherencia entre la fibra y la matriz, señalaron que se puede evaluar mediante métodos indirectos y directos; en los primeros el material se somete a tensión o flexión y la contribución de la fibra se evalúa mediante un análisis matemático que separa la resistencia que corresponde a la fibra. En los métodos directos una fibra o una serie de fibras paralelas se extraen de la matriz. En fibras distribuidas aleatoriamente, es necesario un entendimiento del comportamiento de las fibras inclinadas; dos factores contribuyen: 1) la resistencia a cortante en la interfase; y 2) la acción de dovela de la fibra (efecto de doblado de la fibra y la fricción) que depende del ángulo de inclinación y de las propiedades de la fibra [6].

1.4.2. Nuevos desarrollos: materiales cementicios de alto desempeño.

Materiales cementicios de alto desempeño reforzados con fibra (HPFRCC por sus siglas en inglés) para aplicaciones estructurales son tratados en las memorias RILEM 2006 [39]. Kuder y Shah desarrollaron un nuevo método para evaluar HPFRCC elaborado por extrusión para aplicaciones residenciales (la vivienda representa el 15% del producto bruto doméstico de los Estados Unidos); señalaron que el alto desempeño puede lograrse de diversas maneras: 1) modelado micromecánico (reportado por Li y Wang en 2001); 2) geometrías especiales de fibras; y 3) avanzadas técnicas de procesamiento (como la extrusión). El alto desempeño por extrusión se debe al alto nivel de fuerzas de cortante y compresión durante el mezclado, que densifica la matriz, mejora la adherencia fibra-matriz y alinea las fibras en dirección de la extrusión [40].

Parant *et al.*, reportaron Material cementicio de ultra-alto desempeño (MSFRCC por sus siglas en inglés) elaborado en el laboratorio "Central des Ponts et Chaussées" (LCPC por sus siglas en francés); su diseño se basó en el concepto de "refuerzo de fibras multi-escala" que consiste en añadir fibras cortas y largas; esto afecta la escala del material (aumenta la resistencia a tensión) y la escala estructural (incrementa la capacidad de soporte y ductilidad); la alta resistencia y gran ductilidad evita los refuerzos de acero tradicionales. Losas y cascarones prefabricados fueron sometidos a impacto. El material es elasto-plástico con endurecimiento a la deformación bajo tensión. El laboratorio LCPC patentó un material cementicio reforzado con fibras de acero, de alta resistencia a tensión (> 20 MPa) [41].

1.4.3. Materiales cementicios reforzados con fibra de carbón.

Según Delmonte los Materiales compuestos de altas resistencias con fibras de carbón y grafito comenzaron a producirse en los años sesentas; la fibra de carbón fue utilizada por Tomás Alva Edison como filamento en el desarrollo de la luz eléctrica en 1879. Johnson *et al.*, patentaron en 1968 la producción de fibra de carbón con poliacrilonitrilo (PAN); Shindo *et al.*, patentaron en 1969 la producción

de fibra de carbón con fibras de PVA [41]. El MIL 17 del ASTM reportó que en 1960 se desarrollaron las primeras fibras de alta resistencia y alto módulo para la elaboración de materiales compuestos estructurales para aplicaciones espaciales y militares. Al disminuir el precio de las fibras surgieron gran variedad de aplicaciones: útiles deportivos; botes; frenos de aeroplanos; componentes de automóviles; tanques de almacenamiento; aspas para sistemas de energía por viento, etc. [42].

Varias investigaciones han sido realizadas sobre materiales cementicios reforzados con fibras de carbón [2, 3, 29]; pero el uso masivo industrial de fibra de carbón en concreto fue reportado por Akihama *et al.*, el edificio ARK Mori en Tokio terminado en 1986 tuvo 32.000 m² de concreto reforzado con fibra de carbón (CFRC por sus siglas en inglés) en muros exteriores; la fibra de carbón tuvo longitudes entre 3 y 10 mm; y diámetros entre 15 y 20 μm ; el porcentaje de fibra estuvo entre 2 y 4% (en volumen). El Monumento Al-Shaheed en Bagdad, Irak fue construido por la misma compañía japonesa en 1982 con elementos CFRC. El CFRC presentó mejores propiedades mecánicas (tensión y flexión); la fibra de carbón presenta mejor durabilidad y estabilidad dimensional en el ambiente altamente alcalino del cemento. Se obtuvo aumento de tenacidad bajo tensión con diferentes porcentajes de fibra [1].

Chung reportó estudios de CFRC; el material proporcionó: 1) mejor resistencia a flexión; 2) aumento en la tenacidad a flexión; 3) mejor durabilidad bajo ciclos de carga; 4) mejor durabilidad en ciclos de heladas; 5) mayor resistencia a sismos; 6) disminución del agrietamiento por secado; 7) disminución de la resistividad eléctrica; y 8) disminución de la resistencia a compresión [43]. Chen *et al.*, reportaron el uso de CFRC para la unión con concreto antiguo [44].

1.4.4. Añadido de polímeros y fibras en materiales cementicios.

El añadido de polímeros y la adición de fibras en materiales cementicios surgieron como dos métodos independientes desde hace varias décadas, pero en las últimas décadas se comenzaron a usar de manera conjunta. Issa *et al.*, investigaron concreto modificado con látex y reforzado con fibras de vidrio (resistentes a álcalis), usado como sobre-capa en losas. Usaron fibra de vidrio de módulo elástico de 72 GPa; resistencia a tensión de 1700 MPa; y gravedad específica de 2,68. Compararon la resistencia a compresión del concreto con látex y del concreto con látex y fibras [45].

1.5. Resistencia a cortante de materiales cementicios.

La resistencia cortante es una de las propiedades más importantes de los materiales y de los materiales cementicios, pero para éstos aún no hay prueba normada, ni por el ASTM, ni el ACI en Estados Unidos, aunque Japón publicó la norma JSCI-4 para la determinación del cortante. Barragán *et al.*, estudió el comportamiento de concreto con fibras bajo cargas de cortante, usando la prueba "Push-Off" [46]. Van Zijl estudió la resistencia a cortante de material cementicio usando vigas losipescu; reportó un comportamiento de "endurecimiento por deformación" [47]. Majdzadeh *et al.*, reportaron resultados de pruebas de cortante directo en prismas de concreto con varios porcentajes de fibra. Reportaron tenacidad a cortante. El 1% de fibras (en volumen) fue el porcentaje óptimo. Por el comportamiento frágil del concreto a tensión, la falla a cortante es catastrófica; con las fibras se cambia el modo de falla a cortante, de frágil a dúctil. Las fibras mejoran la tenacidad a la fractura de los tres modos de falla (I apertura; II deslizamiento y III torsión) [48].

Dada la importancia en la seguridad de las estructuras de concreto, diversos estudios se han realizado con vigas de concreto sometidas a carga de cortante, se citan algunos de ellos. Kazemi y Broujerdian estudiaron vigas de concreto (sin estribos) considerando la fricción por cortante y la mecánica de fractura [49]. Elliot *et al.*, estudiaron la resistencia a cortante de vigas pre-esforzadas tipo X (con

fibras de acero) [50]. Reveiz *et al.*, estudiaron variables que afectan la resistencia a cortante de vigas de concreto; señaló que el tema de cortante ha generado mucha investigación y debate desde el siglo XIX; y que el diseño se ha basado en resultados experimentales más que en teoría [51]. Cho y Kim determinaron el aumento de la resistencia a cortante de vigas cortas por fibras de acero [52]. Tan *et al.*, estudiaron la contribución de fibras de acero como refuerzo de cortante en vigas parcialmente pre-esforzadas [53]. Shabaan y Gesund analizaron la resistencia a cortante por punzonamiento en losas planas de concreto reforzado [54]. Narayanan y Darwish estudiaron el cortante en vigas reforzadas con fibras [55]. Mirsayah y Banthia determinaron el cortante de concreto reforzado con fibras de acero; reportaron aumento de la resistencia a cortante por aumento del volumen de fibras [56]. Perumalsamy y Shah señalaron la importancia de la adherencia entre el concreto con fibras y las barras de acero de refuerzo; las fibras contribuyeron con un modesto incremento en la resistencia a cortante y pero causaron una significativa mejora en la ductilidad, por esto, es una de las áreas promisorias en la Tecnología del concreto. Resultados de pruebas de vigas de concreto (con y sin fibras) con refuerzo a flexión probaron que las fibras proporcionan mejoras en flexión y a cortante [6].

Para el diseño de elementos de concreto sometidos a cargas de cortante, existen diversas normas y recomendaciones, entre las cuales están: el Reglamento del DF; las normas del ACI, las normas de Canadá (CSA por sus siglas en inglés) y del RILEM. El TC 162-TDF del RILEM es un procedimiento de diseño y prueba de concreto reforzado con fibra de acero (SFRC por sus siglas en inglés) usa el método σ -w (esfuerzo-ancho de grieta) basado en mecánica de la fractura y conocido como "modelo de grieta ficticia", para un comportamiento de suavizamiento a tensión; el RILEM para cortante propone el cálculo de la capacidad de vigas reforzadas con fibra con barras de refuerzo longitudinales, con base en la propuesta de Casanova y Rossi (1997) para calcular la contribución de las fibras. Conceptualmente, la propagación de la grieta en concreto se modela con una zona difusa de microagrietamiento (zona de proceso) y grieta localizada

[57]. Las CSA A23.3 son normas canadienses para cargas de cortante en concreto reforzado [58].

El ACI propone estimar el valor de la resistencia cortante del concreto simple, como la raíz cuadrada de la resistencia del concreto a compresión a 28 días de edad (f'_c en MPa) dividida entre 6.

El ASTM ha propuesto un método de prueba para obtener el cortante directo en materiales compuestos y cerámicos, usando probetas pequeñas (76 mm de largo y 20 mm de ancho) con doble muesca en el centro (tipo losipescu). El método C1292-95 del MIL 17-5 es para la determinación de la resistencia a cortante en el plano de cerámicos avanzados con fibra continua [42]. El método D 5379/D 5379/M-98 es para la determinación de la resistencia a cortante de material compuesto, usando probetas con muescas en el centro [59]. El método D 5379 ha sido usado para estudiar materiales compuestos a base de grafito [60] y otros materiales compuestos, pero no hay reportes de la aplicación de estos métodos en materiales cementicios reforzados con fibras.

1.6. Materiales inteligentes.

1.6.1. Definición.

Existen varias definiciones de Material inteligente. Wallace define: "un material inteligente es capaz de reconocer un estímulo ambiental, procesar la información y responder de manera apropiada, en el tiempo adecuado"; señaló que la diferencia entre un material convencional y un material inteligente es su carácter dinámico. Un ejemplo de material inteligente son los polímeros conductores electroactivos (CEP por sus siglas en inglés) que han emergido como uno de los mejores en el campo de la investigación [61]. De acuerdo a Addington y Schodek, la NASA define material inteligente: "aquel que recuerda configuraciones y puede conformarse a ellas, cuando se le da un estímulo específico"; la Enciclopedia de Tecnología química, define materiales y estructuras inteligentes, como aquellos

objetos que sensan eventos ambientales, procesan la información y actúan sobre el ambiente [62].

1.6.2. Concreto inteligente.

Tradicionalmente el estudio del concreto y los materiales cementicios se ha enfocado principalmente a las características mecánicas y químicas. Mucho énfasis se ha dado a las propiedades mecánicas para proporcionar seguridad a las estructuras. En las últimas décadas han surgido infinidad de estudios, que se ha enfocado a la durabilidad, debido a la manifestación de fenómenos que destruyen el material con el paso del tiempo, en particular la corrosión electroquímica del acero, debido a este fenómeno se comenzó a profundizar el estudio del comportamiento del flujo eléctrico a través de la masa del concreto. Además, el concreto ha sido utilizado para diversos fines, por ejemplo como capa electromagnética, lo cual implicó estudiar con más profundidad la conductividad eléctrica del concreto. Pero, es a partir de los primeros reportes sobre el acoplamiento electromecánico (piezorresistivo) del concreto por la adición de fibras conductoras, como la fibra de carbón o acero, cuando se comienza a estudiar ampliamente la capacidad sensora y se comienza a emplear el término "concreto inteligente".

Chen y Chung reportaron en 1996 el comportamiento inteligente de material compuesto con matriz cementicia y fibras de carbón; midieron cambios de la resistividad eléctrica bajo cargas mecánicas [63]. En 1998 se registró una patente por parte de la Universidad de Nueva York [3].

Reza *et al.*, estudiaron el comportamiento de material cementicio, sometido a pruebas de tensión compacta, con el fin de usarlo como material estructural inteligente, capaz de informar sobre las condiciones internas de esfuerzo y propagación de grietas; reportaron una buena correlación entre los cambios de la resistencia eléctrica y el comportamiento mecánico. Como antecedente de este método señalaron que la resistencia eléctrica fue usada en el estudio de la

mecánica de la fractura en metales, el método de potencial eléctrico de corriente directa (DC-EPM) fue usado para estudiar grietas según la norma ASTM E647; el principio del método es: "dado un flujo de corriente constante, una grieta de propagación perturba las líneas de corriente e incrementa la diferencia de potencial a través del plano de agrietamiento". La corriente alterna se usa debido a la heterogeneidad del concreto, sus fases e interfases pueden estudiarse con espectroscopia de impedancia; en la cual, la respuesta eléctrica depende de la frecuencia [64].

1.7. Sistemas inteligentes y sensores.

El monitoreo de la salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) aplicada a la infraestructura urbana es una tecnología emergente. Éste y otros sistemas se han estado desarrollando debido a los problemas de envejecimiento y deterioro que presenta la infraestructura; como ejemplo se tiene que en Estados Unidos muchos puentes han rebasado su vida útil y necesitan ser reemplazados y otros ya presentan severos deterioros. Además de los problemas citados, los fenómenos naturales (sismos, huracanes, etc.) también afectan y dañan la infraestructura causando muertes y destrucción. Estos problemas urgen a desarrollar métodos para determinar la seguridad de las estructuras, se necesitan nuevos métodos y sistemas para reforzar y monitorear estructuras existentes, y prevenir daños en las nuevas estructuras. Una parte fundamental de los sistemas de monitoreo son los sensores.

1.7.1. Términos.

Neumann señaló que en Alemania la palabra "Adaptronics" es un término genérico, para disciplinas que internacionalmente son conocidas como: "Materiales inteligentes", "Estructuras inteligentes" o "Sistemas inteligentes", etc. El término "Adaptronic" (Adaptronik en alemán) fue creado por el centro "VDI Technology Center", designa un sistema y su proceso de desarrollo, donde al menos uno de los elementos funcionales de un circuito regulador funcional, tiene múltiples funciones; el circuito regulador garantiza que la estructura muestre

características autónomas de adaptación y pueda adaptarse a sí misma a diferentes condiciones. Un Sistema adaptrónico se caracteriza por su adaptabilidad y multifuncionalidad, son ejemplos: 1) los lentes con vidrio fotocromico que dependiendo del brillo externo ambiental se oscurecen o dejan pasar luz de manera autorregulada, este elemento cubre los tres elementos de un circuito regulador (el sensor, el agente de respuesta y la unidad de control), cubre las funciones de forma y óptica; 2) las ventanas cuya transparencia se regula automáticamente de manera autónoma, o se ajustan en segundos con solo apretar un botón; 3) los hidroplanos cuya estructura aerodinámica se adapta a si misma dependiendo de las condiciones de vuelo [65].

1.7.2. Centros de desarrollo.

En el mundo existen varios centros de desarrollo de sistemas inteligentes. El Centro de sistemas y materiales Inteligentes (CIMSS por sus siglas en inglés) en Virginia, Estados Unidos; el Centro de estructuras inteligentes de alto desempeño (CIHPS por sus siglas en inglés) de la Universidad Politécnica de Hong Kong; el Centro Tecnológico VDI creado por el Ministerio de Investigación y Tecnología en Dusseldorf, Alemania; y el sistema ISIS de Canadá.

En el CIMSS (www.cimss.vt.edu) los términos "Sistemas de materiales inteligentes", "Estructuras adaptativas" y "Estructuras inteligentes" se refieren al uso integrado de estructuras: actuadores, sensores y sistemas de control, que permiten una adaptación del sistema como respuesta a las condiciones externas. Como ejemplos, estructuras mecatrónicas (incluyen edificios), puentes y caminos que pueden sensar y controlar el daño; aviones que activamente monitorean su integridad y vehículos con materiales activos que reducen vibraciones y mejoran el funcionamiento. Ejemplo de estructuras y materiales inteligentes, es la integración de materiales piezocerámicos, aleaciones de memoria de forma y otros materiales acoplados electromecánicamente en sistemas que responden al ambiente. Las áreas de investigación del centro son: 1) análisis y diseño de sistemas y estructuras inteligentes; 2) técnicas de monitoreo de la salud de la infraestructura

de sistemas civiles y estructuras aeroespaciales; 3) diseño de actuadores, sensores y sistemas de control híbrido, entre otros.

El centro CIHPS de la Universidad Politécnica de Hong Kong tiene como áreas de investigación: el desarrollo de sensores inteligentes y materiales estructurales inteligentes. Los sensores inteligentes son muy importantes en estructuras de tercera generación; para aplicaciones estructurales se estudian varios tipos: 1) fibra óptica, 2) ferromagnéticos, 3) de forma y 4) piezoeléctricos. El centro realiza evaluaciones periódicas del desempeño de sensores, para la medición de las respuestas estructurales de: desplazamiento, velocidad, aceleración, deformación y esfuerzo; y para detectar daños estructurales. Otras investigaciones del centro son: detección de daño en estructuras de materiales compuestos, fibra óptica en Ingeniería civil, vibración en sistemas de placa delgada. Uno de los proyectos que ha desarrollado es la aplicación de sensores de fibra óptica para el monitoreo estructural del puente Tsing Ma, usando interferometría laser para la detección de daño estructural (www.cse.polyu.edu.hk/cihps).

1.7.3. Aplicaciones.

“Estructuras inteligentes” es un proyecto europeo para el monitoreo y la evaluación de la durabilidad de estructuras de concreto, desarrollado entre septiembre 1998 a febrero 2002, en un puente de concreto en Dinamarca. El sistema fue diseñado para evaluar el daño en el concreto estructural. Participaron 8 compañías de tres países (Dinamarca, Alemania e Italia). (<http://smart.ramboll.dk/>).

En el puente se usaron un total de 99 sensores. Fueron instalados, para medir: corrosión, cloruros, pH, humedad, deformación, temperatura, un total de 440 señales para monitorear. Se usaron sensores de capacitancia y de fibra óptica, entre otros.

1.7.4. Sensores.

Una investigación similar a la presente fue realizada por Wallace *et al.*, quienes analizaron sensores a base de polipirrol (PPy) para medir deformaciones; los sensores presentaron cambio de la resistencia eléctrica debido al cambio de longitud. Observaron un rango dinámico, linealidad e histéresis; en licra cubierta con PPy al someterse a estiramiento, la resistencia eléctrica aumentó hasta el 5% de deformación y disminuyó después de esta deformación [61].

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Introducción

Este capítulo comprende tres temas sobre ciencia de materiales: 1) Comportamiento mecánico; 2) Comportamiento eléctrico de aislantes, conductores y semiconductores; y 3) Acoplamiento electromecánico (Teoría de piezorresistividad). La primera parte se enfoca al comportamiento mecánico de un sólido sometido a cortante puro y presenta su expresión matemática. La segunda parte, explica el flujo eléctrico a través de los materiales sólidos, en particular del material cementicio; define parámetros eléctricos y enuncia leyes; presenta la influencia del añadido de fibras conductoras discretas distribuidas aleatoriamente en el material cementicio; describe los tipos de conducción en base a la Teoría de percolación. La tercera parte, presenta el acoplamiento electromecánico denominado piezorresistivo; se presenta en forma tensorial la relación entre los parámetros eléctricos y mecánicos; se define la matriz de coeficientes piezorresistivos que corresponde al caso anisotrópico, y se presenta una Teoría piezorresistiva para materiales cementicios que trata de explicar el aumento de la resistencia eléctrica; por último se presentan las ecuaciones usadas tradicionalmente para de cierto tipo de sensores piezorresistivos (galgas extensométricas) que ayudan a discernir sobre la influencia de los cambios geométricos y de la resistividad eléctrica en la resistencia del material.

2.2. Cortante puro.

El comportamiento de materiales debido a fuerzas de cortante es una temática muy importante en la ciencia e ingeniería de materiales; también es muy importante en el análisis y diseño de elementos de materiales cementicios debido a las fallas catastróficas que produce por su carácter frágil. En la mecánica de la fractura, los modos de fractura II y III corresponden a este tipo de cortante; el modo II corresponde específicamente al cortante en el plano [66], temática de este estudio.

La Teoría plana de elasticidad para esfuerzo plano, puede visualizarse con la Figura 2.1, y la notación de planos de acuerdo con los ejes mostrados.

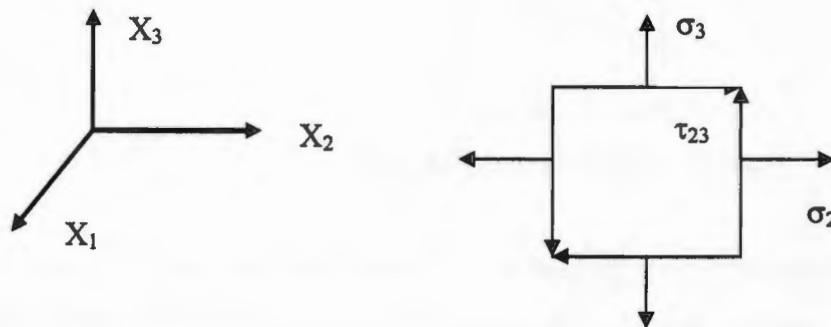


Figura 2.1. Porción de un sólido sometido a esfuerzo plano, σ_1 es cero.

La ecuación 2.1 representa la relación entre esfuerzos y deformaciones para el estado de esfuerzo plano [67], donde γ_{23} es la deformación angular, E es el Módulo de elasticidad y ν es el Coeficiente de Poisson:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Un caso especial de la expresión anterior, es el estado de cortante puro, que se presenta cuando el primer invariante de esfuerzos (I_1) es igual a cero. En el caso de esfuerzo plano donde σ_1 es igual a cero, la ecuación 2.1 se reduce a:

$$\tau_{23} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{23} \quad (2.2)$$

El estado de cortante puro, puede representarse como se muestra en la Figura 2.2.

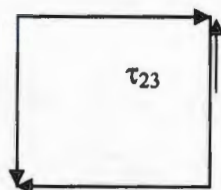


Figura 2.2. Estado de cortante puro.

En la fórmula 2.2 la expresión que antecede a la deformación angular (γ_{23}), se denomina módulo de corte o módulo de rigidez (G en unidades de esfuerzo); sustituyendo la expresión por el módulo G , la fórmula se reduce a:

$$\tau_{23} = G\gamma_{23} \quad (2.3)$$

2.3. Parámetros eléctricos.

La Ley de Ohm establece una relación entre voltaje, amperaje y resistencia eléctrica; de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

R es la resistencia eléctrica (en ohm); V es el voltaje (en volt); I representa a la corriente eléctrica (en ampere). En un material óhmico, en una gráfica en la cual el amperaje es la abscisa y el voltaje la ordenada, la resistencia R es la pendiente, se cumple que a mayor amperaje mayor voltaje. La conductancia (R^{-1}) es el recíproco de la resistencia (en ohm^{-1} , Siemens S o mho). La discusión teórica de "Polímeros conductores" expresa que la Ley de Ohm es una ley empírica relacionada con la termodinámica irreversible, según Ilya Prigogine (Premio Nobel de Química 1977), quien señaló que el flujo eléctrico es resultado de un gradiente de potencial, en el cual la energía se disipa. No todos los materiales obedecen la

ley; las descargas de gas, los tubos al vacío, semiconductores y los conductores de una dimensión (cadena de polieno lineal) se desvían de la ley [68]. En materiales óhmicos la resistencia (R) es proporcional a la longitud (L) de la muestra e inversamente proporcional al área transversal (A), según la referencia [68] y el ASTM para materiales conductores:

$$R = \rho L/A \quad (2.5)$$

La resistividad eléctrica (ρ en $\text{ohm}\cdot\text{m}$ en el Sistema Internacional) es una propiedad eléctrica del material; la conductividad eléctrica (σ_e) es el inverso de la resistividad (en $\text{ohm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ o $\text{mho}\cdot\text{m}^{-1}$). La Figura 2.3 presenta conductividades eléctricas de diversos materiales y el intervalo de los Polímeros conjugados que pueden comportarse como aislantes, semiconductores o metales [68].

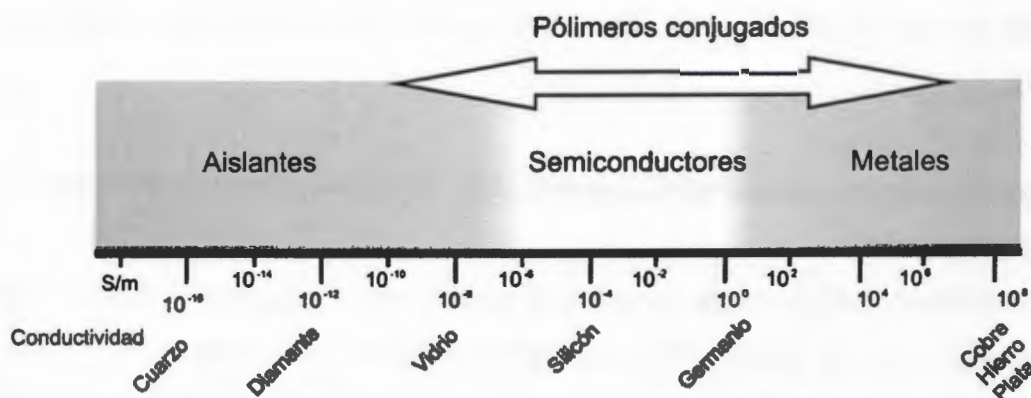


Figura 2.3. Intervalo de conductividad de Polímeros conjugados [68].

2.4. Teoría de percolación.

Bentz y Garboczi señalaron que la Teoría de percolación fue desarrollada para analizar matemáticamente un medio desordenado; el desorden es definido por una variación aleatoria del grado de conectividad; el principal concepto de la teoría es la existencia de un nivel de percolación definido como " p_c ", parámetro que define

el grado de conectividad entre unidades de un sistema arbitrario; cuando $p=0$ todas las sub-unidades están totalmente aisladas unas de las otras; cuando $p=1$ todas las sub-unidades están conectadas con un número máximo de vecindad entre las sub-unidades [69].

Stauffer comparó la “Teoría de la percolación” con la coagulación de aglomerados, con la polimerización y con el modelo de pilas de arena. En 1941 Paul Flory publicó la primera “Teoría de percolación”, para describir la transición de sol a gel en polímeros ramificados. En 1943 la teoría fue aplicada por Stockmayer al área de Inmunología. En 1957 la teoría fue estudiada por Broadbent y Hammersley. La primera simulación por computadora se realizó en 1960. Las aplicaciones de la teoría han sido en: flujo en medios porosos, mezclas conductor-aislante, elasticidad de material compuesto y fallas de Internet [70]. Neelakanta describe la percolación como un fenómeno en el cual el flujo percola o prolifera a través de un medio a lo largo de rutas aleatorias. El comportamiento crítico de la permitividad dieléctrica de materiales compuestos metal-aislante cerca del límite de percolación fue estudiado por Grannan *et al.*, en matriz de KCl con pequeñas partículas de plata [71].

2.5. Flujo eléctrico en materiales cementicios con partículas conductoras.

2.5.1. Introducción.

El comportamiento eléctrico de un material puede ser: 1) aislante o dieléctrico; 2) semiconductor; y 3) conductor; un semiconductor se encuentra entre el comportamiento aislante y el conductor. Un criterio basado en la conductividad eléctrica establece ciertos límites aproximados entre estos comportamientos [68]. Ejemplos de aislantes son los polímeros; de semiconductores el silicón y el germanio; y de conductores los metales. El gran éxito de la electrónica en el siglo XX, se dio gracias al desarrollo de materiales semiconductores, en particular de las válvulas electrónicas denominadas transistores.

El material cementicio puede comportarse como aislante (cerámicos) y como semiconductor; es muy buen aislante en estado seco y actúa como semiconductor en presencia de humedad; también puede convertirse en semiconductor por el añadido de fibras conductoras (carbón, acero, etc.) o de partículas conductoras (negro de humo, grafito, etc.). En estado seco el material cementicio presenta el fenómeno de resistencia a la polarización, que consiste en el aumento de la resistencia eléctrica por la reorientación de las partículas, que varía con el tiempo.

Los mecanismos de conducción de la corriente eléctrica son: 1) electrolítica y 2) electrónica. El primero se presenta por movimiento de iones y el segundo por movimiento de electrones. El material cementicio es un sistema poroso en el cual los poros pueden ser ocupados por agua; ésta puede formar rutas por donde el flujo eléctrico puede circular, como consecuencia la conductividad eléctrica aumenta y el fenómeno de conducción es de naturaleza electrolítica.

El tipo de corriente (directa o alterna) aplicada en materiales cementicios produce resultados diferentes en la superficie de los electrodos usados para la aplicación de la corriente. La corriente directa produce un efecto en la superficie de los electrodos; la alterna no afecta la superficie.

La adición de fibras de carbón convierte al material cementicio en semiconductor. El concreto conductor puede servir para derretir hielo en carreteras.

2.5.2. Resistividad eléctrica sin partículas conductoras.

La medición de la resistividad eléctrica en materiales cementicios se ha realizado por diversos motivos: 1) entender el proceso de hidratación del cemento a edades tempranas y su relación con otras propiedades (principalmente el endurecimiento); 2) la evaluación de las características del concreto por medios electromagnéticos (radar); para determinar el riesgo de corrosión de las varillas de refuerzo.

Halabe *et al.*, estudiaron las propiedades electromagnéticas del concreto para evaluar de manera rápida sus características. El concreto, el asfalto, el suelo y las rocas son materiales dieléctricos que se comportan simultáneamente como aislantes y conductores de las ondas electromagnéticas. Si la conductividad es alta, el material atenúa grandemente las ondas electromagnéticas y la profundidad de penetración de las ondas es baja. Las propiedades más importantes de un material dieléctrico son: la parte real y la parte imaginaria de su permitividad dieléctrica compleja; la parte real es asociada con la velocidad de fase y la parte imaginaria se relaciona con la atenuación de las ondas electromagnéticas; la parte real de la permitividad dieléctrica se refiere a la constante dieléctrica, la imaginaria es el factor de pérdida [72].

Diversos factores pueden afectar la resistividad eléctrica del material cementicio: 1) el fenómeno de hidratación; 2) la humedad; 3) la edad del material; 4) la cantidad de agregados pétreos; 5) la adición de fibras o partículas conductoras; 6) el método de medición; y 7) la contaminación del agua en los poros, por ejemplo con cloruros. La edad y la cantidad de agregados aumentan la resistividad eléctrica; la humedad y las partículas conductoras la disminuyen.

Princigallo *et al.*, estudiaron la resistividad del concreto a edades tempranas (en condiciones isotérmicas 20°C) para sensor cambios de la microestructura; variaron el porcentaje de agregado de cero hasta 75%. La resistividad fue afectada por la hidratación y el contenido de agregados. Analizaron la extensión y propiedades de la zona interfacial (ITZ por sus siglas en inglés). Una correlación entre la resistencia a compresión y el porcentaje de agregados fue establecida. La Espectroscopia dieléctrica fue utilizada porque provee alta sensibilidad, versatilidad y la posibilidad de operar de manera remota. La permeabilidad al agua fue más alta en mortero que en pasta de cemento. La resistividad eléctrica fue más alta en mortero que en pasta. La frecuencia de 20 MHz fue elegida para minimizar los efectos de polarización en la interfase pasta-electrodo. La resistividad eléctrica aumentó con el tiempo por los cambios microestructurales;

los cambios en la composición química de la fase líquida del poro desempeñaron un papel menor. La fase líquida continua (principal ruta para el flujo de corriente) disminuyó durante la hidratación. La conductividad de agregados fue menor que la pasta. La conductividad eléctrica para pasta a edades tempranas fue de 1,8 S/m y para concreto con 75% de agregado de 0,3 S/m [73].

Naik *et al.*, estudiaron la conducción eléctrica del concreto en mezclas con ceniza volante de alto contenido de carbón; Monforte reportó en 1968 que el concreto húmedo es semiconductor y secado en horno es aislante. La resistividad está relacionada con el grado de hidratación. Establecieron una correlación entre la resistencia eléctrica y la compresión. El incremento del volumen de agua y la concentración de iones en el agua de los poros, disminuyen la resistividad de la pasta. Farrar en 1978 reportó que en concreto conductivo la transmisión eléctrica se debe principalmente a las partículas conductoras y no requiere electrolito [74].

Banthia *et al.*, reportaron aumentos de la resistividad en mortero y en pasta por aumento de la edad. Al aumentar la relación agua/cemento (a/c) disminuyó la resistividad [75]. Halabe *et al.*, desarrollaron un modelo de las propiedades electromagnéticas del concreto [72]. Neville reportó una resistividad de 7,9 ohm·m en concreto a 28 días con relación agua/cemento (a/c) de 0,6 a 1000 Hz y 4V [4]. Wen y Chung en 2001 reportaron el efecto del esfuerzo mecánico en la polarización eléctrica del cemento [76].

Neville reportó la resistividad en función de la relación agua/cemento, a mayor a/c la resistividad disminuye; esta propiedad es importante en durmientes de vías de ferrocarril y en corrosión del acero. Reportó una resistividad de concreto húmedo de 100 ohm·m y de 10^9 ohm·m para concreto seco; la resistividad del agregado fue infinitamente más alta. Un concreto eléctricamente conductivo (patentado) fue elaborado reemplazando el agregado fino con carbón cristalino (casi puro); tuvo resistividades de 0,005 y 0,2 ohm·m; el cambio del agregado no afectó la resistencia a compresión y otras propiedades [4].

2.5.3. Fibras conductoras en matriz cementicia.

El MIL 17 del ASTM reportó resistividades de fibra de carbón de tres tipos de fibras: 1) estándar; 2) industrial; y aeroespacial de alto módulo; 18, 11 y 2,5 $\mu\text{ohm}\cdot\text{m}$ respectivamente [42]. La adición de fibras conductoras (fibra de carbón o acero) produce un aumento en la conductividad del material compuesto cementicio [2,75]. Chung reportó resistividades de mortero con fibras de carbón: 8730; 378; 93,7; 37,9; 22,3 y 17,2 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ (para porcentajes de fibra: 0,2; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5 y 2 respectivamente, en masa de cemento) [2].

Las variables que afectan la conductividad de la mezcla son: 1) la conductividad de las fibras; 2) la conductividad de la pasta de cemento; 3) el curado; 4) la polarización eléctrica; 5) la temperatura; 6) la dispersión de las fibras; 7) la edad de la mezcla; 8) el método de medición; y 9) el porcentaje de fibras añadido a la mezcla.

El mecanismo de conducción depende del punto de percolación; antes de este punto se puede presentar el efecto túnel; después del punto, el mecanismo de conducción es electrónico y se da por contacto de fibras. Sun *et al.*, estudiaron el fenómeno de conducción por agujeros en mezclas de cemento con fibras de carbón con variación de temperatura; propusieron un nuevo modelo de conducción: la suma de la conductividad iónica por agujeros y la electrónica [77].

Wen y Chung estudiaron la polarización eléctrica de cemento con fibras, observaron una variación de la resistividad con el 1% de fibras (en peso) a 250 segundos; se observó también con látex [78].

La pasta de cemento en estado seco es aislante [4]; Chung reportó conductividad de 10^{-9} S/m para pasta de cemento en estado seco [2], este valor sitúa a la pasta entre los aislantes, como el vidrio (10^{-8} S/m) y el diamante (10^{-12} S/m) en una escala de conductividad de la referencia [68], según ésta, el máximo aislante es el cuarzo con conductividad de 10^{-16} S/m.

La pasta de cemento húmeda tiene mayor conductividad que la pasta seca. Hansson y Hansson reportaron conductividad de $7 \cdot 10^{-2}$ S/m a 20 y 200 días [98]. Banthia reportó $6,3 \cdot 10^{-2}$; $8,6 \cdot 10^{-3}$; y $1,5 \cdot 10^{-3}$ S/m; a 1, 7 y 28 días respectivamente [75]. Chung reportó $2 \cdot 10^{-4}$ S/m [2]. Estos valores ubican a la pasta húmeda como material semiconductor, cercano al silicón (10^{-4} S/m).

Las fibras de carbón tienen alta conductividad eléctrica [42]; Banthia reportó conductividad eléctrica de fibras de carbón entre 7 y $8 \cdot 10^4$ S/m (de fibras de $18 \mu\text{m}$ de diámetro) y entre 1 y $1,1 \cdot 10^7$ S/m (de fibras de $25 \mu\text{m}$) [75]. Chung reportó conductividad de fibras de carbón de 10^6 S/m (de fibras continuas) y $3,3 \cdot 10^4$ S/m (de fibras cortas) [2]. Estos valores ubican a las fibras de carbón en la zona de metales; el cobre, hierro y plata tienen una conductividad de 10^8 S/m. En contraste el látex (emulsión polimérica) es un aislante y tiene muy baja conductividad, su adición disminuye la conductividad de la mezcla de cemento, pero mejora: 1) la dispersión de las fibras (aumenta la conductividad); 2) la trabajabilidad de la mezcla fresca; y 3) la adherencia fibra-matriz.

2.6. Acoplamiento electromecánico: piezorresistividad.

2.6.1. Introducción.

Una fuerza mecánica aplicada en un sólido crea cambios en la resistencia eléctrica, este fenómeno se denomina “piezorresistividad”. El esfuerzo mecánico de tensión aumenta la resistencia eléctrica (disminuye el flujo eléctrico); la compresión disminuye la resistencia eléctrica (aumenta el flujo eléctrico) en el rango elástico; la flexión aumenta la resistencia eléctrica en la zona de tensión y la disminuye en la zona de compresión (en el rango elástico); pero los resultados que se han reportado son mixtos. El flujo eléctrico paralelo o transversal a la dirección de la aplicación de la carga mecánica presenta resultados diferentes. El cambio en el flujo eléctrico puede ser por cambios geométricos (longitud o área) o por cambio de la resistividad del material; una fuerza aplicada en un sólido produce deformaciones o cambios en la geometría, pero también genera cambios en la

microestructura del material, como el micro-agrietamiento, éste causa aumento de la resistencia eléctrica (o disminución del flujo). El nivel de carga mecánica tiene importantes efectos; en el rango elástico los cambios se producen principalmente por cambios geométricos; en el rango inelástico, el efecto es principalmente por microagrietamiento; la aparición de fracturas produce un aumento considerable de la resistencia eléctrica.

2.6.2. Piezorresistividad.

Capurso y Schulze presentaron el campo eléctrico E_i en forma tensorial, de acuerdo a la Fórmula 2.6. Donde la resistividad (ρ_{ij}) y el esfuerzo (σ_{kl}) son tensores polares de rango dos. El tensor polar π_{ijkl} de cuarto rango es el coeficiente de piezorresistividad eléctrica y representa el acoplamiento electromecánico. La densidad de corriente está representada como J_j [79].

$$E_i = \rho_{ij} J_j (1 + \pi_{ijkl} \sigma_{kl}) \quad (2.6)$$

De acuerdo a la misma referencia [79], la piezorresistividad π_{ijkl} que se puede expresar de acuerdo a la fórmula 2.7, se define como el cambio normalizado de la resistividad con respecto al esfuerzo, donde los subíndices del paréntesis T, E se refieren a la Temperatura y al campo eléctrico E, como constantes.

$$\pi_{ijkl} = \frac{1}{\rho_{ij}} \left(\frac{\partial \rho_{ij}}{\partial \sigma_{kl}} \right)_{T,E} \quad (2.7)$$

La piezorresistividad tiene unidades inversas al esfuerzo (m^2/N o Pa^{-1}). Otra manera de expresar las relaciones entre los parámetros eléctricos y mecánicos es usando la serie de MacLaurin [101]:

$$dE_i = \left(\frac{\partial E_i}{\partial I_j} \right) dI_j + \left(\frac{\partial E_i}{\partial \sigma_{kl}} \right) d\sigma_{kl} + \left(\frac{1}{2!} \right) \left[\left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial I_j \partial I_m} \right) dI_j dI_m \right] +$$

$$\left(\frac{1}{2!} \right) \left[\left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial \sigma_{kl} \partial \sigma_{no}} \right) d\sigma_{kl} d\sigma_{no} \right] + \left[\left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial \sigma_{kl} \partial I_j} \right) d\sigma_{kl} dI_j \right] + \text{Términos de más}$$

alto orden

(2.8)

Donde la parcial del campo eléctrico E_i con respecto a la densidad de corriente I_j es la resistividad eléctrica:

$$\frac{\partial E_i}{\partial I_j} = \rho_{ij} \quad (2.9)$$

La parcial del campo eléctrico E_i con respecto al esfuerzo mecánico σ_{kl} es la piezoelectricidad conversas:

$$\frac{\partial E_i}{\partial \sigma_{kl}} \quad (2.10)$$

La parcial de segundo orden del campo E_i con respecto a la densidad de corriente I_j , es la resistividad no lineal:

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial I_j \partial I_k} \quad (2.11)$$

La parcial de segundo orden de E_i con respecto al esfuerzo y a la densidad de corriente I_j es la piezorresistividad eléctrica (π_{ijkl}):

$$\left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial \sigma_{kl} \partial I_j} \right) = \frac{\partial}{\partial \sigma_{kl}} \left(\frac{\partial E_i}{\partial I_j} \right) = \pi_{ijkl} \quad (2.12)$$

De la ecuación 2.12 se obtiene:

$$\frac{\partial E_i}{\partial I_j} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.13)$$

Los cambios fraccionales o normalizados de la resistividad eléctrica establecen las siguientes relaciones:

$$\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_o} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.14)$$

En función de la resistencia eléctrica R (usada en la Tecnología de sensores o galgas extensométricas), la fórmula anterior se convierte en:

$$\frac{\Delta R_{ij}}{R_o} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.15)$$

La matriz de coeficientes π de 81 elementos se reduce por simetría a una matriz de 36 elementos como se muestra en el siguiente arreglo, en el caso de este estudio se estudia el efecto de E_i (para $i=1,2$ y 3), por lo que los coeficientes a obtener son los afectados por el esfuerzo τ_{23} .

$$\pi_{ijkl} = \begin{pmatrix} \pi_{1111} & \pi_{1122} & \pi_{1133} & \pi_{1123} & \pi_{1131} & \pi_{1113} \\ \pi_{2211} & \pi_{2222} & \pi_{2233} & \pi_{2223} & \pi_{2231} & \pi_{2213} \\ \pi_{3311} & \pi_{3322} & \pi_{3333} & \pi_{3323} & \pi_{3331} & \pi_{3313} \\ - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

La matriz de esfuerzos en el caso de esfuerzo de corte puro en el plano X_2X_3 es:

$$\sigma_{kl} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tau_{23} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Que corresponde al esfuerzo que se señala en la siguiente Figura 2.4:

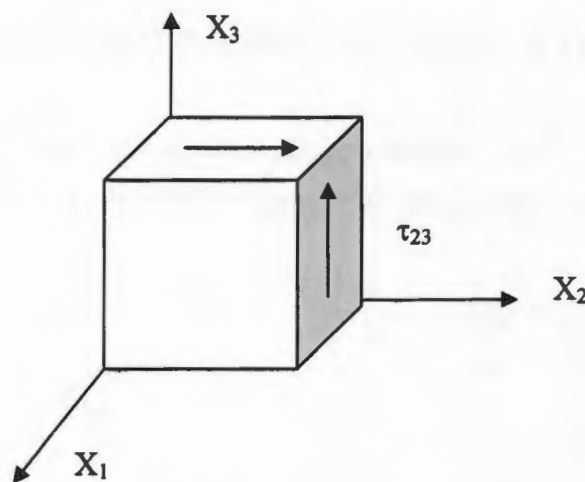


Figura 2.4. Esfuerzo cortante en el plano.

2.6.3. Sensores piezorresistivos.

Las galgas extensométricas son sensores piezorresistivos usados para el análisis experimental de esfuerzos. Se basan en el principio observado por Lord Kelvin, en el cual, un metal al ser alargado sufre un aumento en su resistividad. Existen diversos tipos de galgas [80]. En la Figura 2.5 se muestra una galga extensométrica de 350 ohm de la empresa VISHAY, con “factor de galga” (GF por sus siglas en inglés) de 2,10.

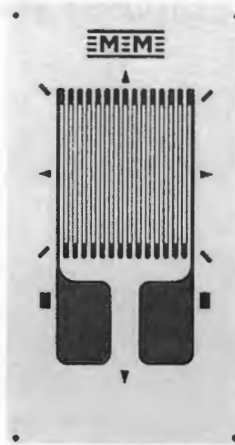


Figura 2.5. Galga extensométrica EA-06-125AC-350 VISHAY.

El análisis de los cambios fraccionales en las galgas extensométricas piezorresistivas se basan en la fórmula (2.5), en la cual aplicando diferenciales, tenemos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.18)$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\epsilon} = 1 + \nu - \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\epsilon} = S_A \quad (2.19)$$

Donde S_A es la sensibilidad o factor de galga, ν el coeficiente de Poisson; y ϵ la deformación unitaria. .

2.7. Comportamiento piezorresistivo de matriz cementicia con fibras.

La piezorresistividad en materiales cementicios con fibras conductoras ha sido estudiada por varios investigadores (Tabla 2.1). Entre las principales variables que se han estudiado están: 1) el tipo de carga mecánica aplicada (tensión directa, compresión simple y flexión en vigas); 2) el comportamiento en las zonas elástica e inelástica; 3) efecto de la dirección del flujo eléctrico (paralelo o transversal a la dirección de la fuerza mecánica); y 4) comportamiento bajo cargas estáticas y dinámicas. Se han usado métodos basados en corriente directa y alterna. Generalmente, se ha usado el método de las cuatro puntas. Los materiales

cementicios con fibra de carbón y de acero son: cemento (pasta de cemento); mortero (arena y cemento); y concreto.

Tabla 2.1. Investigaciones de material cementicio con fibras de carbón.

Autores	Año	Mat.	Método	Carga	Flujo
Chen & Chung [63]	96	M	R (4)-cd	Co-T-F	P
Fu <i>et al.</i> [81]	97	M	Reactancia R(2)-ca	Co	P
Fu & Chung [82]	97	M	R (4)-cd. Curado	Co	P
Fu <i>et al.</i> [83]	98	P	R-cd. Ozono.	T	P
Fu & Chung [37]	98	C	R (4)-cd	Extracción	P
Chung [3]	98		Patente		
Shi & Chung [84]	99	C	R (4)-cd	Tráfico	
Wen & Chung [85]	00	P	R (4)-cd	T. Ciclos.	P-T
Wen & Chung [86]	01	P	R (4)-cd	Co. Ciclos.	P-T
Reza <i>et al.</i> [64]	03	M	R(4)-RLC-ca 100Hz	Co. Ciclos.	P-T
Wen & Chung [87]	03	P	R (4)-cd	Co-T. Ciclos	P
Wen & Chung [88]	05	P	R (4)-cd	Co. 3 ciclos.	P-T
Wen & Chung [89]	06		Teoría		
Wen & Chung [90]	07	P	R (4)-cd	Co	P
Wen & Chung [91]	08	P	R(4)-cd	Humedad	P

P: Pasta; M: mortero; C: concreto. R (4): método 4 puntas; cd corriente directa; ca corriente alterna. Co: compresión; T: tensión; F: flexión. P: Flujo eléctrico paralelo a la carga mecánica; T: Flujo eléctrico transversal a la carga mecánica. RLC: Circuito formado por una resistencia, una bobina y un capacitor.

Chen y Chung en 1996 estudiaron el fenómeno piezorresistivo bajo tensión, compresión y flexión; en la zona elástica e inelástica; se produjo cambio en la resistencia eléctrica, reversible en la zona elástica e irreversible en la zona inelástica y en la fractura. La resistencia eléctrica aumentó por: 1) efecto de la extracción de la fibra en la zona elástica; 2) rompimiento de fibras y propagación de grietas en la zona inelástica [63]. Fu *et al.*, estudiaron el efecto sensor de mortero con fibras de carbón mediante impedancia de CA (10 Hz) bajo compresión; la reactancia fue más sensitiva a las deformaciones que la resistencia eléctrica; el incremento fraccional ($\Delta Z/Z$) de la reactancia fue 38 a la falla, mientras

que el incremento fraccional ($\Delta R/R$) de la resistencia eléctrica fue 23, para mortero con metilcelulosa, sílica y fibras (0,35% en volumen); tanto la resistencia como la reactancia disminuyeron al aumentar la frecuencia; el mortero con látex fue menos sensitivo que el elaborado con metilcelulosa [81]. Fu y Chung estudiaron el efecto sensor por acción del curado en mortero con fibras de carbón (el factor de galga en este material ha alcanzado valores de 500); la resistencia eléctrica incrementó monotónicamente durante la primera carga (7 días de curado); pero a los 14 y 28 días de curado disminuyó; el efecto se debe al debilitamiento de la interfase fibra-matriz a medida que el curado progresa [82]. Fu *et al.*, estudiaron el mejoramiento del efecto sensor ante ciclos de carga de tensión (rango elástico 0,9 MPa; resistencia 1,97 MPa) por tratamiento de fibras de carbón con ozono; durante el primer ciclo la resistencia eléctrica se incrementó, en los siguientes ciclos el aumento fraccional se mantuvo constante; en contraste en fibras sin ozono se presentó una disminución del cambio fraccional en ciclos de carga posteriores. Se observó un aumento del cambio fraccional al aumentar la carga y una disminución al disminuir la carga; en fibras sin ozono el Factor de galga (adimensional) fue de 625 y con ozono de 700 [83]. Fu y Chung estudiaron la adherencia entre el concreto y la varilla de acero de refuerzo usando un método denominado “prueba de extracción electromecánica”. Estos investigadores reportaron una correlación entre la adherencia y la resistividad eléctrica de contacto: a mayor adherencia, mayor resistividad [37]. Shi y Chung estudiaron concreto con fibras de carbón para monitorear el tránsito vehicular y el pesaje en movimiento; la resistencia eléctrica disminuyó por aumento del esfuerzo aplicado (hasta 1 MPa) y por el aumento del porcentaje de fibras (de 0,5 a 1,0% en peso de cemento) [84].

Wen y Chung estudiaron el comportamiento de la resistividad en la dirección longitudinal y transversal a la tensión mecánica en cemento con fibras de carbón; la tensión uniaxial causó un incremento reversible tanto en la resistividad longitudinal como en la transversal, el factor de galga fue similar (89 longitudinal y -59 transvesal); en contraste la carga de compresión causó una disminución reversible en la resistividad longitudinal [85]. Wen y Chung reportaron disminución

reversible de la resistividad tanto longitudinal como transversal de cemento con fibras de carbón sometido a compresión (régimen elástico) [86]. Reza *et al.*, estudió los cambios de la resistencia eléctrica bajo compresión de cemento con fibras de carbón; observaron una disminución de la resistencia eléctrica en flujo eléctrico paralelo a la dirección de la carga; pero en la dirección perpendicular no hubo un efecto en la resistencia eléctrica [64]. Chen y Chung realizaron un estudio comparativo de cemento con fibras de carbón y acero como material sensor de la deformación; las fibras de carbón (debajo del punto de percolación) son mejores sensores piezoresistivos que las fibras de acero inoxidable; pero el factor de galga de éstas es mayor bajo tensión; en el caso del acero el mecanismo de piezoresistividad se presenta por el contacto fibra-fibra; en el caso de las fibras de carbón es por efecto de la deformación en el contacto fibra-matriz; bajo tensión el cambio fraccional con fibras de acero aumento en tres ciclos de carga; bajo compresión el cambio fraccional disminuyó hasta la máxima deformación, en la descarga aumentó hasta la deformación cero; con fibras de carbón el comportamiento fue similar [87]. Chen y Chung estudiaron el factor de galga en cemento con fibras de carbón; bajo compresión tanto en la dirección longitudinal como transversal a la carga, el factor disminuyó [88]. Wen y Chung presentaron un modelo piezoresistivo en cemento con fibras de carbón; de acuerdo a los autores el comportamiento del cemento con fibras como sensor de deformación se reportó por primera vez en 1993, pero en este artículo se presentó el primer modelo teórico de este fenómeno [89]. Wen y Chung estudiaron la piezoresistividad bajo compresión de cemento con fibras en el régimen elástico; demostraron que el método de cuatro puntas es mejor que el de dos; contactos embebidos presentaron mejores resultados que la pintura de plata; el cambio fraccional disminuyó en el primer ciclo de carga (10 ciclos con carga creciente) [90]. Wen y Chung estudiaron el efecto de la humedad en la piezoresistividad en cemento con fibras de carbón bajo compresión; el cambio fraccional disminuyó; la condición saturada afecta pero el efecto piezoresistivo se mantiene fuerte [91].

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Materiales.

3.1.1. Material compuesto cementicio.

Se elaboraron tres tipos de mezclas: 1) sólo cemento (P pasta de cemento); 2) cemento con látex (L); y 3) cemento con látex, reforzado con fibras de carbón (F).

Se usó Cemento Pórtland tipo CPC 30R de Cementos Mexicanos (CEMEX) de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. Todas las mezclas se prepararon con agua potable.

En las mezclas que usaron látex, se mezcló agua y emulsión polimérica con proporción de 1:1 (en volumen). La emulsión SikaLátex-N de la empresa SIKA; es un aditivo adherente y mejorador de la resistencia de mortero de cemento; elaborada a base de emulsión sintética de resinas elastoméricas SBS. La emulsión tiene densidad de 1,04 kg/litro a 23° C; contenido de sólidos entre 18 y 20,5%; viscosidad entre 2000 y 4000 cps, adherencia de 8,8 MPa (88 kg/cm²) en plano inclinado según ASTM C-1059-91 [92]. La literatura [13] reporta una densidad de 1,01 para el SB que coincide con el usado en esta investigación; respecto al contenido de sólidos la literatura reporta un 47% [20] y un 48% [13], el porcentaje utilizado en este estudio es menor; la viscosidad en la literatura se reporta entre 20 y 50 cps [20] y de 24 [13], en este estudio la viscosidad es más alta; el pH de la literatura se reportó entre 9 y 11 [20] y de 10 [13].

Las fibras de carbón son de origen polimérico PAN (poliacrilonitrilo); tipo IM7 de la marca Hexel de 5 µm de diámetro; las fibras no recibieron tratamiento superficial (se tomaron directamente del rollo de fábrica). Las fibras se cortaron de 5 mm de longitud y se distribuyeron al azar en la mezcla; para su manejo se usaron guantes de látex para no contaminar la superficie. Según el fabricante, las fibras tienen resistencia a tensión de 5.150 MPa; módulo (intermedio) de tensión de 276 GPa; contenido de carbono del 98% y densidad de 1,78 g/cm³ [93].

3.1.2. Moldes para probetas.

Se elaboraron probetas de cortante según la norma ASTM D 5379 (Figura 3.1) [59]. Se fabricó un molde de metal (Figura 3.2) para doce probetas, para elaborar moldes de silicón (Figura 3.3). El caucho de silicón fue polisil P 85 de la empresa Poliformas Plásticas (Figura 3.4). Las dimensiones de las probetas fueron: longitud 75 mm, ancho 18 mm y espesor de 10 mm.



Figura 3.1. Probeta de pasta de cemento para prueba de cortante según ASTM D 5379 [59].



Figura 3.2. Molde de metal para elaborar moldes de silicón.



Figura 3.3. Molde de silicón para elaborar probetas de cemento.



Figura 3.4. Caucho de silicón para moldes.

3.1.3. Tintura de plata para conexión eléctrica probeta-conductores.

Se usó tintura de plata coloidal (CW2200STP) en la superficie de la probeta de cemento para la conexión con cables de conexión con el equipo de medición. La tintura en presentación de 8,5 g de la empresa ITW Chemtronics de Georgia, EE.UU., es usada para dibujar trazos en circuitos electrónicos, con capacidad para soportar soldaduras y seca en minutos, con contenido de plata (7440-22-4) y diversos componentes a base de acetatos de resina acrílica.

3.2. Equipos y accesorios.

3.2.1. Preparación de la mezcla.

Se usó una revolvedora Hobart para la preparación de las mezclas. Se usaron básculas OHAUS digitales para obtener la masa de los materiales.

3.2.2. Máquina universal.

Se usó una máquina universal de fabricación japonesa marca SHIMADZU con capacidad de carga de 100 kN (Figura 3.5). Se usaron celdas de carga de 5.000 y 100.000 N. Se usó el programa TRAPEZIUM del equipo.



Figura 3.5. Máquina universal SHIMADZU (CICY).

3.2.3. Accesorio para prueba de cortante.

Se usó un accesorio de metal para pruebas de cortante (Figura 3.6) de acuerdo a la norma ASTM D 5379 [59]; de la empresa estadounidense Wyoming Test Mixtures, Inc.

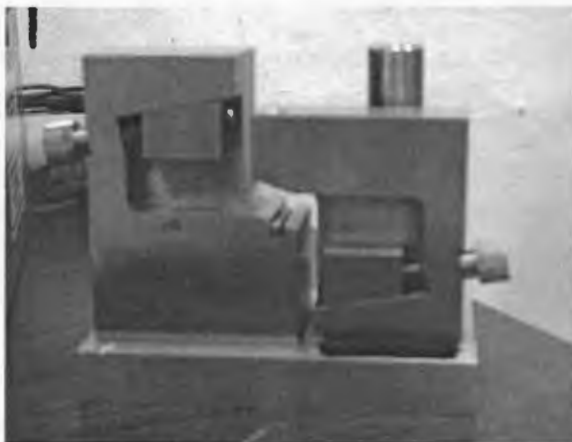


Figura 3.6. Accesorio para cortante según ASTM 5379 [59].

3.2.4. Resistividad y Resistencia eléctrica.

Las pruebas se realizaron con un multímetro FLUKE modelo 189 con conexión a computadora por puerto USB, con capacidad de 300 Mohm y transmisión de datos vía infrarrojo; con sensibilidad de 0,01 ohm y software FLUKE.



Figura 3.7. Equipo de medición de carga mecánica y resistencia eléctrica.

3.2.5. Microscopía.

Se usó un microscopio estereoscópico MOTIC 10x DM143 de fabricación china, con software Motic Images 2000 versión 1.3, en las pruebas preliminares. En las pruebas definitivas, se usó un Microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés); la superficie de cemento con fibras de carbón (conductoras), no necesitó tratamiento superficial (Figura 3.8).



Figura 3.8. Microscopio electrónico de barrido (CICY).

3.2.6. Deformaciones.

Se usaron galgas extensométricas y equipo de la empresa VISHAY para la medición de la deformación de cortante, con arreglo de 45 grados.

3.3. Proporcionamiento y preparación de mezclas.

Se elaboraron tres tipos de mezclas, Figura 3.9. Se elaboraron 12, 32 y 24 (un total de 68) probetas, para las mezclas P, L y F, respectivamente.

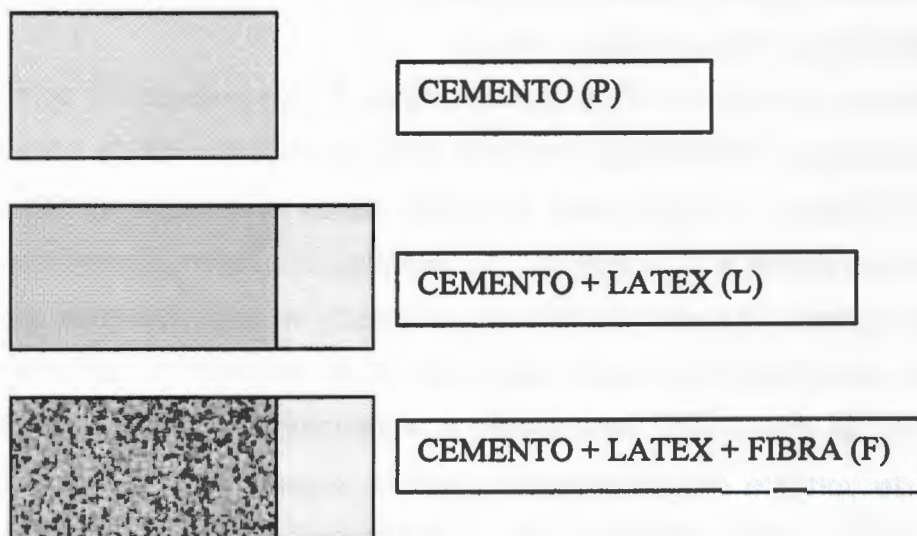


Figura 3.9. Tres tipos de mezclas a base de cemento: P, L y F.

Las proporciones de la mezcla se dan en la Tabla 3.1 (para 100 g de cemento), todas las cantidades en gramos. Para la pasta de cemento se usó una relación agua/cemento (a/c) de 0,5. En la mezcla L, la proporción agua-látex fue 1:1 (en volumen). El porcentaje de fibra fue de 1% con respecto a la masa de cemento. La preparación de la mezclas se realizó de acuerdo al procedimiento C 305-99 del ASTM [94]; las fibras se mezclaron manualmente con el agua y el látex. Terminada la revoltura de la mezcla, el material se vertió en los moldes y se vibró en la mesa vibratoria durante 3 minutos. El curado se realizó en el laboratorio, a temperatura ambiente. El desmolde se realizó transcurridos 6 días.

Tabla 3.1. Proporciones de las mezclas de cemento, en gramos.

Material	P	L	F
Cemento	100	100	100
Agua	50	25	25
Látex		25	25
Fibra			1

3.4. Procedimientos de medición y prueba.

3.4.1. Resistencia mecánica a cortante.

Las mezclas de cemento (P) y cemento-látex (L) se probaron a cortante con la máquina universal SHIMADZU hasta la falla, de acuerdo con la norma ASTM D 5379 [59] (Figura 3.10). Después de probar varios niveles de rapidez de prueba, se determinó probar a 0,5 mm/min. Las probetas con fibra tuvieron dos niveles de carga de cortante: 1) hasta 300 N (rango elástico), se probaron doce probetas; y 2) a la falla, se probaron seis probetas. La edad de las probetas en el momento de prueba fue de más de 28 días, debido a la disponibilidad del equipo. Se midió el módulo de cortante en tres probetas (una de pasta y dos de fibra), con galgas extensométricas inclinadas 45° (con la horizontal), la aplicación de la carga fue manual.



Figura 3.10. Probeta de cortante en accesorio de acuerdo al ASTM D 5379 [59].

3.4.2. Resistencia mecánica a compresión simple.

Probetas de las tres mezclas (P, L y F) se sometieron a carga de compresión simple hasta la falla, se usó la máquina universal SHIMADZU, la rapidez de aplicación de carga fue de 5 mm/min. La prueba de compresión simple se realizó de acuerdo a la norma del ASTM C109/C-01 [95]. Las probetas en el momento de prueba tuvieron más de 30 días de edad. Dos secciones transversales fueron usadas: cuadrada y rectangular.

3.4.3. Conductividad eléctrica en 3 ejes ortogonales.

Se midió la resistencia eléctrica para determinar la conductividad eléctrica en tres ejes ortogonales (X_1 , X_2 , X_3) en probetas losipescu, según Figura 3.11. En el eje X_1 la aplicación del flujo eléctrico (E_1) fue en la parte central; en el eje X_2 el flujo (E_2) se aplicó en los extremos de la probeta; en el eje X_3 el flujo (E_3) se aplicó en las muescas centrales. Las áreas de contacto fueron diferentes; en el eje X_3 el área de los extremos fue de (10 x 18 mm) 180 mm². Además, se midió la conductividad en probetas cúbicas de 50 mm a través de un solo eje.

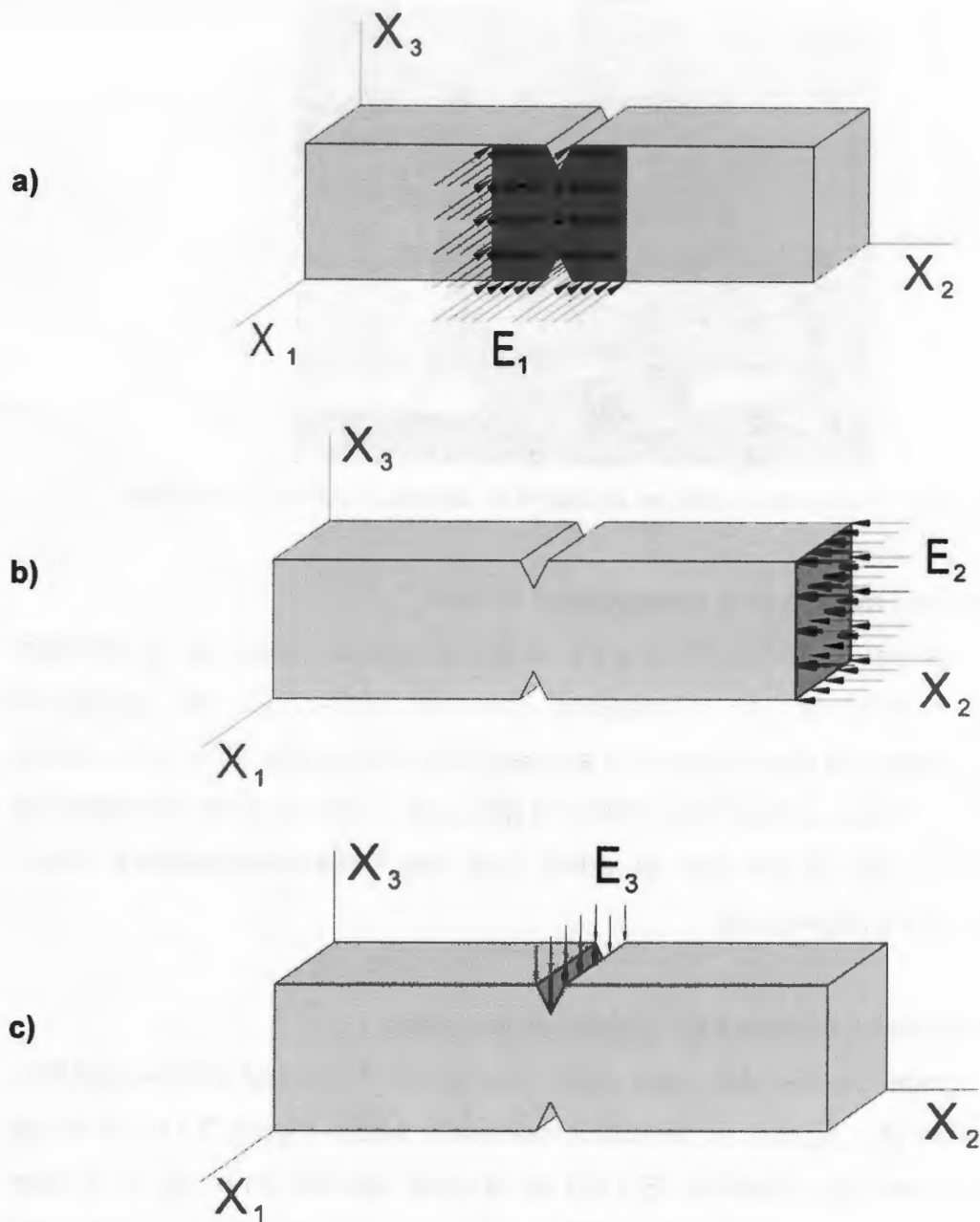


Figura 3.11. Flujo eléctrico (E_i) en tres direcciones ortogonales: a) E_1 a través del eje X_1 en el centro; b) E_2 a través del eje X_2 en los extremos; c) E_3 a través del eje X_3 a través de las muescas.

3.4.4. Resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_0).

La medición de la resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_0) se realizó dos veces: 1) un día antes de la aplicación de la carga mecánica; durante 180

segundos; 2) Inmediatamente antes de la aplicación de la carga mecánica; durante 60 segundos. Se tomó como R_0 la medición a 60 segundos.

3.4.5. Acoplamiento esfuerzo cortante (τ)-resistencia eléctrica (R).

La mezcla con fibras se probó en dos regímenes: elástico e inelástico. Para el flujo en el eje X_1 la carga mecánica se aplicó hasta la falla (rango inelástico), seis probetas. Para los flujos en los ejes X_2 y X_3 , la carga se aplicó hasta 300 N (rango elástico), se probaron seis probetas para cada eje. Simultáneamente a la aplicación de la carga mecánica, se midió la resistencia eléctrica. Se usó la máquina universal SHIMADZU y el multímetro FLUKE, el arreglo de medición se muestra en la Figura 3.12.

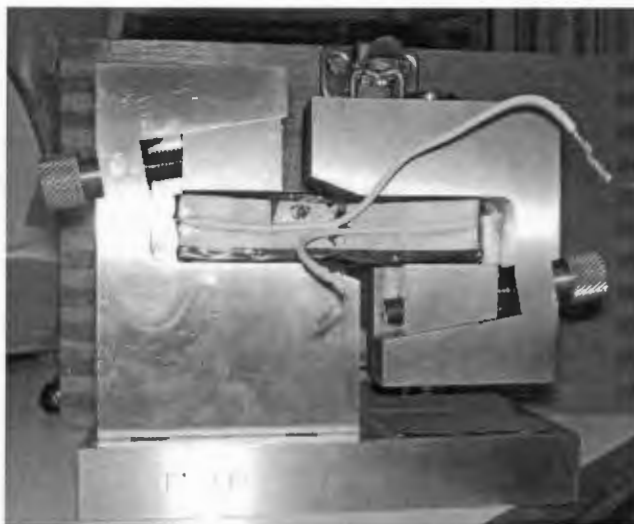


Figura 3.12. Probeta con aplicación de flujo a través del eje X_2 , en los extremos.

La preparación de las probetas para la aplicación de carga mecánica y simultáneamente la medición de la resistencia eléctrica consistió en: 1) aplicación de tintura de plata en la superficie de las probetas para la conexión de dos cables; 2) aplicación de una resina polimérica sobre la superficie de la probeta para la sujeción de cables y evitar su desprendimiento; 3) colocación de varias capas de cinta aislante en toda la superficie de la probeta para el aislamiento y evitar contacto con el accesorio metálico usado para la aplicación de la carga de cortante. Terminadas las probetas se evitó someter las probetas a otras condiciones (horno) y evitar posibles daños, esto tuvo como consecuencia no

tener la masa de la probeta en el momento de la prueba, para el cálculo de la humedad. Se intentó simular las mismas condiciones de humedad de un concreto en servicio, por tanto, las probetas se mantuvieron dentro del laboratorio.

La edad de prueba de las probetas estuvo en función de la disponibilidad del equipo de medición.

3.4.6. Análisis de fracturas.

Después de la carga mecánica, con la ayuda de un equipo HP se escanearon todas las probetas, para determinar la geometría de las fracturas. Se obtuvieron imágenes de las superficies frontal y posterior. La superficie de fractura se estudió con microscopía electrónica.

3.4.7. Análisis de datos.

Para el análisis de datos se usaron los programas ORIGIN y Excel.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Comportamiento de material cementicio bajo cortante.

4.1.1. Esfuerzo cortante último (τ_u).

El cortante es uno de los tipos de carga más importantes en el análisis mecánico de los elementos estructurales, sin embargo, en la Tecnología del concreto, debido a la fragilidad del concreto, pocas estudios se han realizado al respecto [47], pero las mejoras debidas al uso de emulsiones poliméricas y la adición de fibras en el concreto han ayudado a cambiar el comportamiento frágil del concreto a un comportamiento más dúctil [15,19,29,46], como consecuencia, estas mejoras han abierto la posibilidad de realizar pruebas de cortante, sin embargo, hasta el momento, aún no se publican métodos de pruebas de cortante para materiales cementicios, ni del ASTM, ni del ACI, que son las normas más frecuentemente utilizadas en diversos países. En este estudio exploratorio, se analizó de manera breve, el efecto de una emulsión polimérica y de la adición de fibras en una pasta de cemento. Los resultados de este estudio se presentan en la Figura 4.1, en la cual se comparan los esfuerzos cortantes (τ_u) de las tres mezclas: Pasta (P), Látex (L) y Fibras (F). En esta Figura se presentan tres diagramas de bloques que señalan los promedios y los percentiles correspondientes a 25, 50 y 75; en la misma Figura se grafica una línea horizontal que corresponde a uno de los valores más altos encontrados en la literatura de concreto reforzado con fibras [46].

Efecto del látex.

La adición de látex en la mezcla de pasta de cemento, como se observa en la Figura 4.1 no tuvo efecto significativo en la resistencia a cortante, la mezcla de pasta de cemento tuvo un promedio de 2,10 MPa mientras que la mezcla con látex tuvo 1,96 MPa, para confirmar completamente este resultado, se necesita realizar mayor número de pruebas, ya que el número de pruebas en este estudio exploratorio fue reducido (6 probetas por mezcla). En la literatura no se encontraron reportes sobre el efecto del látex en mezclas cementicias bajo cortante, pero sí se encontraron reportes del efecto de la adición de látex en mezclas cementicias bajo otros tipos de cargas, para los cuales se reportaron

tanto incrementos como disminuciones. Colak [19] reportó que el látex polimérico afecta las propiedades mecánicas y de durabilidad de pastas, morteros y del concreto; y que la magnitud del efecto depende del tipo de látex y de su concentración en la mezcla; también reportó que las mejoras a tensión y flexión se logran cuando los niveles de concentración son mayores que cierto valor crítico, pero también observó que puede presentarse una reducción de la compresión debido a la reducción de la cantidad de cemento. Dikeou [15] reportó incrementos de las resistencias a compresión y a tensión, pero también reportó disminución del Módulo de elasticidad a compresión. Chen y Chung [29] reportaron un aumento de tres veces la resistencia a tensión y un aumento del módulo de tensión. La referencia [23] reportó aumento de la resistencia a compresión para un 15% de látex en volumen y cambio de una fractura de frágil a uno de cedencia. Odler y Liang [18] reportaron disminuciones en las siguientes propiedades de pasta de cemento con copolímero estireno-butadieno: densidad, Módulo de elasticidad a compresión, resistencia a compresión y dureza; pero también reportaron aumentos de la resistencia a flexión y del trabajo a fractura [18]. Wang y Wang reportaron disminuciones hasta del 50% de la resistencia a compresión, en mortero con emulsión estireno-butadieno para un 20% en masa de la relación polímero/cemento [17]. En resumen, en este estudio la adición de látex no afectó la resistencia a cortante, al parecer no se rebasó la cantidad crítica del material; la literatura presenta aumentos de la resistencia a compresión, pero también disminuciones por exceso de látex. Los aumentos en la literatura fueron en: todos los estudios de tensión, flexión y a la fractura; las disminuciones correspondieron a: la densidad, el Módulo de elasticidad a compresión y a la dureza.

La mejora de la resistencia a tensión por adición de látex en mezcla cementicia reforzada con fibras fue reportada por Chen y Chung [29] en una mezcla con el 0,53% en volumen de fibras de carbón. La mezcla sin látex tuvo una resistencia de 2,45 MPa mientras que la mezcla con látex tuvo una resistencia de 3,15 MPa un aumento de 0,70 MPa que representa un aumento del 29% de la resistencia a tensión.

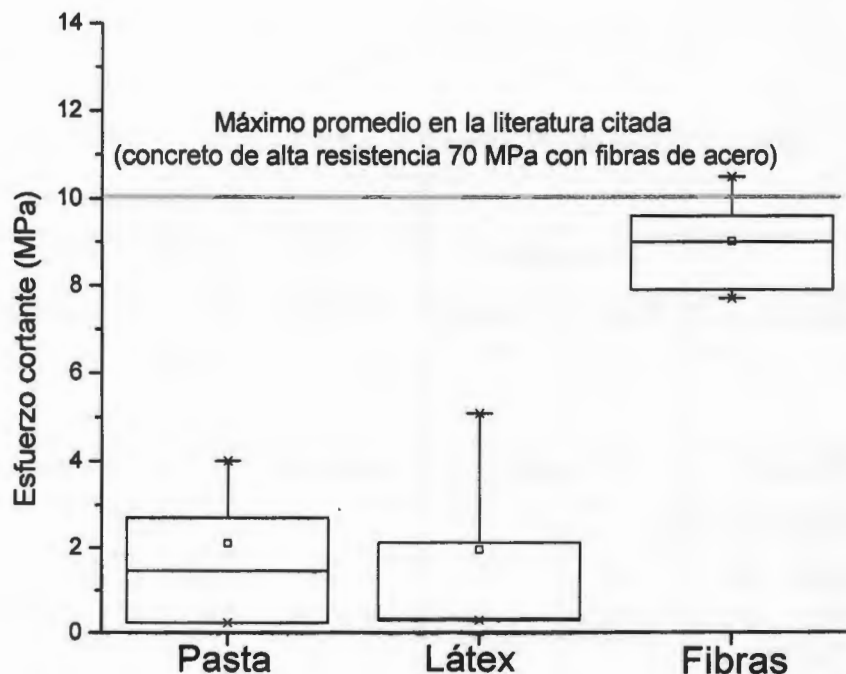


Figura 4.1. Esfuerzo cortante (τ_u) de este estudio, de mezclas sin fibras y con 1% de fibras de carbón.

Efecto de la adición de fibras.

El efecto de la adición de fibras en un material cementicio puede observarse en la Figura 4.1, en la cual se observa que la Mezcla de cemento con látex y fibras de carbón (F) de este estudio tuvo un promedio y una variación de $9,02 \pm 1,40$ Mpa, el aumento por la adición del látex se descarta de acuerdo a los párrafos anteriores, este promedio resultó cuatro veces mayor que el promedio de las mezclas sin fibras (P y L); este alto aumento coincide con lo reportado por Perumalsamy y Shah [6] de un estudio de cortante en un concreto especial reforzado con fibras de acero (SIFCON) que tuvo una resistencia de 30,9 MPa y sin fibras 5,5 MPa, se usaron probetas tipo "doble L" (push off).

La Tabla 4.1 compara el promedio de esfuerzos de cortante (τ_u) y módulos de cortante (G) del presente estudio y de la literatura, de concreto sin y con fibras.

Las filas del 1 al 7 proporcionan información de: las referencias, del material de las mezclas, los tipos de probeta, la rapidez de aplicación de carga y las edades de prueba.

Tabla 4.1 Esfuerzo promedio τ_u y módulo de cortante G.

1				Referencias			
2		Este estudio		[47]	[46]	[46]	[6]
3	Mezcla	Pasta	Látex	SHCC*	Concreto		
4					30 MPa	70 MPa	SIFCON
5	Probeta	losipescu		losipescu	Doble L		
6	Rapidez, mm/min	0,5		1,5	0,06		
7	Edad, días	56	70	14	28	28	
8	τ_u , Mpa	2,10	1,96	-	4,1	5,5	5,5
9	G, Gpa	8,4					
10	Fibra		Carbón	PVA	acero		Acero
11	τ_u , Mpa		9,02	3,99	6,2	8,2	30,9
12	Fibra, %		1	2	20**		
13	τ_u , MPa			4,07	5,9	10,0	
14	Fibra, %			2,5	40**		
15	G, GPa		23,8	2,8/3,16***	-		
16	No. Probetas	6		3	3		

* Strain Hardening Cement Based Composite. ** kg/m³. *** Para 2 y 2,5% de fibra en volumen.

El esfuerzo cortante último (τ_u) en materiales cementicios sin fibras presentó los valores de la fila 8 de la Tabla 4.1. Barragán *et al.*, [46] reportaron promedios de 4,1 MPa para concreto normal (30 MPa a compresión) y 5,5 MPa para concreto de alta resistencia (70 MPa a compresión), se observa un aumento del cortante del 34% en el concreto de alta resistencia. Perumalsamy y Shah [6] reportaron una resistencia a cortante de 5,5 MPa. Los valores reportados en la literatura para

concreto son de 2 a 5 veces lo obtenido en este estudio para pasta de cemento sin fibras.

La adición de fibras produce aumento del esfuerzo cortante según la fila 11 de la Tabla 4.1, la fila 10 tiene los tipos de fibra usados en este estudio y en la literatura, la fila 12 contiene los porcentajes o cantidades de fibra (en kg/m^3), en la referencia [47] el porcentaje de fibras fue respecto al volumen. En la referencia [46] la adición de fibras de acero de 20 kg/m^3 produjo un aumento del 50%, tanto para el concreto normal como para el de alta resistencia; se observa también que al duplicar la cantidad de fibras de 20 a 40 kg/m^3 (fila 13) se obtuvo un aumento del 25% del cortante pero sólo para el concreto de alta resistencia (70 MPa). En el SHCC [47] al aumentar el porcentaje de fibras del 2,0% al 2,5% no se obtuvo aumento. La mezcla con fibras (F) de este estudio, tuvo un esfuerzo cortante similar a lo reportado por Barragán *et al.*, [46] para concreto de alta resistencia con 20 Kg/m^3 de fibras de acero; y duplicó lo reportado para SHCC [47]. Sólo dos valores de la literatura [6,46] rebasaron la resistencia a cortante del material reforzado con fibras de carbón de este estudio. Los mayores valores de la Tabla 4.1 se presentaron en materiales reforzados con fibras de carbón y de acero. La resistencia a la tensión de las fibras de acero puede variar de 345 a 1.380 MPa [6], las usadas en la referencia [47] tuvieron resistencias de 1.100 y 2.200 MPa para concreto de 30 y 70 MPa respectivamente. En contraste las fibras de PVA del SHCC tienen una resistencia a tensión más baja. Las fibras de carbón de este estudio tienen una resistencia a tensión de 5.150 MPa [93] que resulta mayor que todas las resistencias anteriores. El valor máximo encontrado en este estudio para el cortante fue 30,9 MPa del SIFCON.

Módulo de cortante (G).

El Módulo de cortante (G) para materiales cementicios está escasamente reportado, en la Tabla 4.1 sólo hay dos valores (2,8 y 3,16 GPa) de la literatura [47] para el SHCC con porcentajes de fibra de 2,0 y 2,5% respectivamente. Los Módulos de este estudio fueron 8,4 MPa para pasta (P) y 23,8 GPa para la mezcla

con fibras de carbón (F), las fibras de carbón (con módulo de elasticidad a tensión $E = 276 \text{ GPa}$) aumentaron el triple la rigidez a cortante del material. Para fines de comparación un estudio sobre el Módulo de cortante para un Material compuesto de matriz polimérica con fibras de vidrio [97] reportó una variación del módulo entre 1,3 y 5,1 GPa, señalando que los manuales para este tipo de material sugieren un valor de 3 GPa; este valor resulta similar al SHCC. La fibra de carbón tiene un módulo a tensión de 276 GPa, mientras que las fibras de PVA tienen un módulo menor, como consecuencia el Módulo de cortante del material con fibras de carbón es mayor.

4.1.2. Comportamiento frágil y cuasi-dúctil de mezclas con y sin fibras.

Con el fin de comparar el comportamiento a la fractura de las mezclas, se presenta la Figura 4.2 con curvas carga-desplazamiento vertical de las mezclas P, L y F (con valores máximos extremos). Las mezclas sin fibras (P y L) presentaron comportamiento frágil con falla catastrófica, aunque se observa un comportamiento un poco más dúctil de la mezcla con látex (L); en contraste la mezcla con fibras (F) presentó un comportamiento más dúctil y una mayor tenacidad. El látex le proporcionó más ductilidad a la pasta de cemento, pero le disminuyó la rigidez. La mezcla con fibras presentó la máxima resistencia a cortante, en la curva puede observarse la "primera grieta" y un comportamiento de "endurecimiento por deformación" de acuerdo al ASTM C 1018 [34], este comportamiento coincide con el ECC en el cual el endurecimiento se considera como un aumento de la carga a partir de la primera grieta [39].

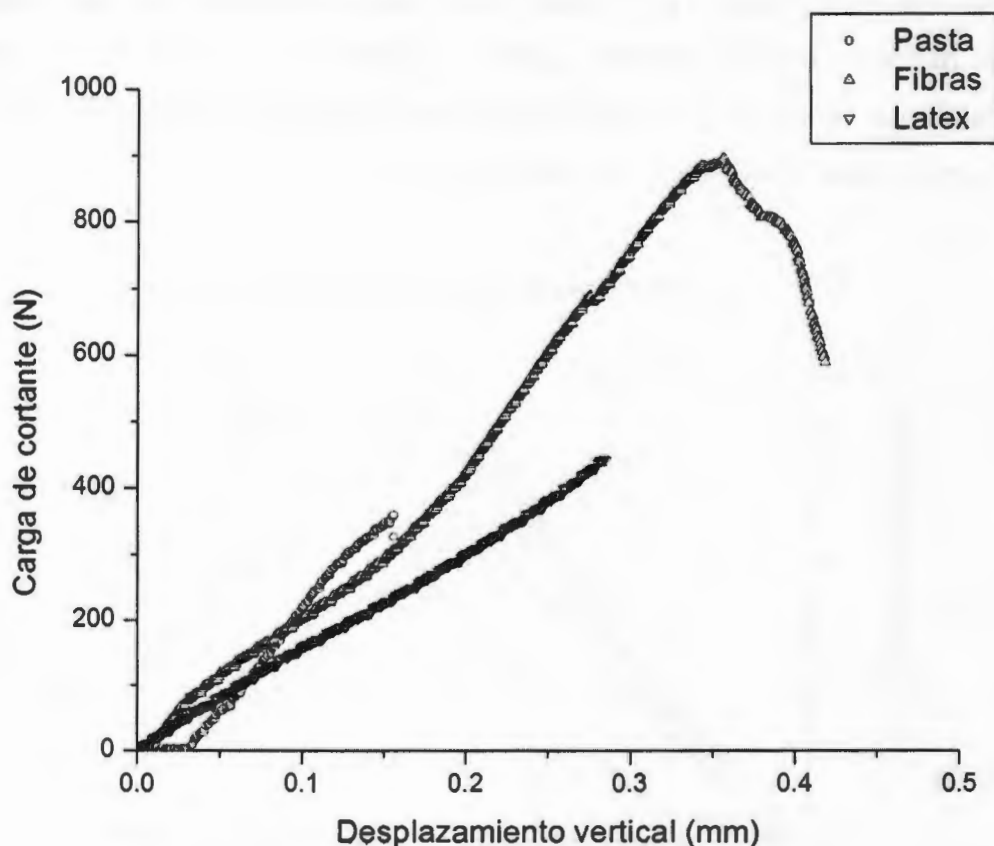


Figura 4.2. Curvas de carga-desplazamiento vertical (valores extremos) de mezclas sin fibras (P y L) y con 1% de fibras de carbón con respecto a la masa de cemento (F).

Mezcla con fibras (F).

La Figura 4.3 presenta curvas esfuerzo-desplazamiento vertical de las pruebas realizadas en este estudio. Todas las curvas presentan “primera grieta” y la mayoría presenta un comportamiento de “endurecimiento por deformación” (aumento de la resistencia después de la primera grieta, según el ASTM 1018 [34]). Barragán *et al.*, reportaron comportamiento lineal hasta la “primera grieta”, seguido por una zona no-lineal hasta τ_u para una cantidad de fibras de 40 kg/m^3 , se observó un incremento de esfuerzo después de la primera grieta; en la zona post-pico hubieron significativas resistencias residuales [46]. En las curvas esfuerzo-deformación de vigas losipescu de concreto simple obtenidas por Van Zijl se observaron 3 zonas: 1) “inicial” con comportamiento no-lineal; 2) “intermedia”

con comportamiento lineal; y 3) “final” con comportamiento no-lineal hasta el esfuerzo máximo; no se observó “primera grieta” [47]. Wong *et al.*, reportó comportamiento lineal hasta el 40% del esfuerzo último (τ_u); después de τ_u se observó una severa disminución del esfuerzo [96].

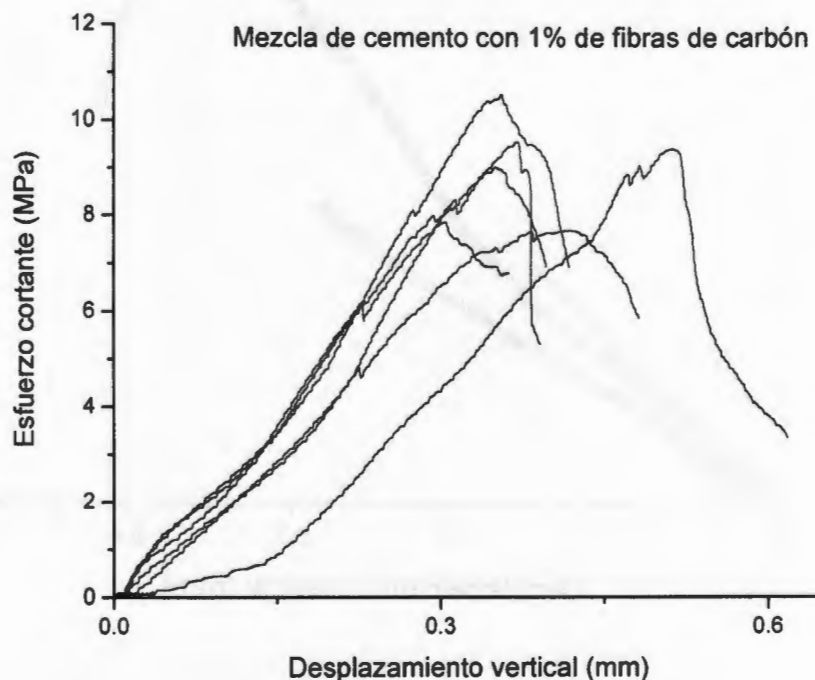


Figura 4.3. Curvas esfuerzo-desplazamiento vertical de la mezcla con 1% de fibras respecto a la masa de cemento (F) de este estudio.

En las curvas de la Figura 4.3 se observan regiones que pueden considerarse con un comportamiento lineal, antes del esfuerzo último; el fin de la linealidad se sitúa entre el 63 y el 87% (77% en promedio) del esfuerzo último. Barragán *et al* reportó el fin de la linealidad a 83% de τ_u para concreto de alta resistencia [46].

La Figura 4.4 presenta un modelo tri-lineal para la mezcla con fibras (F) de este estudio; los puntos de inflexión son: la “primera grieta” y el “esfuerzo último”. Las dos primeras zonas tienen pendientes positivas; la zona inicial tiene una mayor pendiente o rigidez, a partir de la primera grieta se observa una disminución de la

pendiente o rigidez. La zona de disminución de carga presenta la máxima pendiente (en valor absoluto).

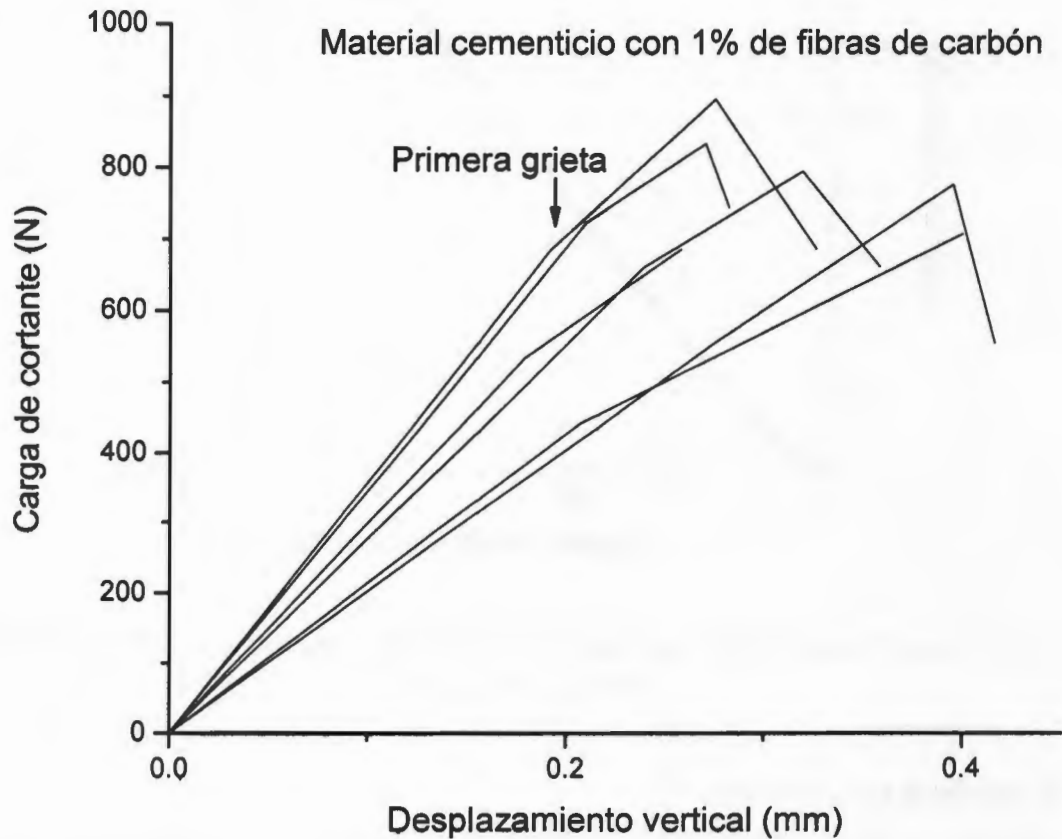


Figura 4.4. Modelo tri-lineal para la mezcla con 1% de fibras de carbón (F) de este estudio.

La Figura 4.5 presenta una curva experimental y un ajuste polinomial (grado 9) para una probeta de la mezcla con fibras de este estudio; los ajustes polinomiales de todas las probetas tuvieron coeficientes de correlación R^2 entre 0,98902 y 0,99972. Los polinomios permiten fácil cálculo de áreas bajo la curva (tenacidad) y de τ_u .

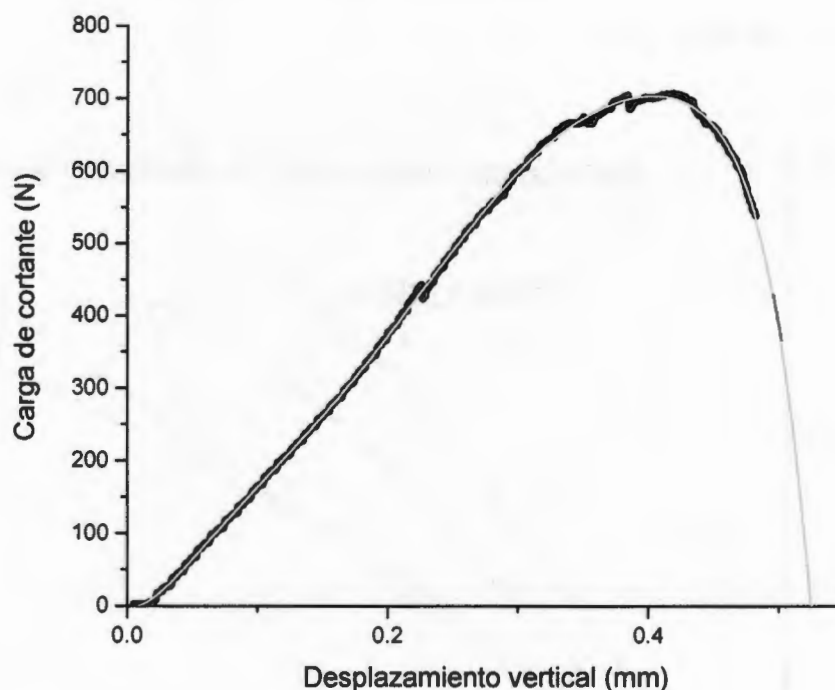


Figura 4.5. Curvas experimental y de ajuste de una probeta de la mezcla con 1% de fibras de carbón de este estudio.

4.1.3. Fractura por cortante.

En mezclas sin fibras (P y L), la aplicación de la carga de cortante generó grietas diagonales (Figura 4.6), con ángulo de 45° respecto a la horizontal, debido al esfuerzo de tensión generados en dicho plano. Grietas diagonales fueron reportadas en vigas losipescu de concreto simple [47]. Un agrietamiento similar fue reportado por Borzani *et al.*, [60] en probetas de grafito.

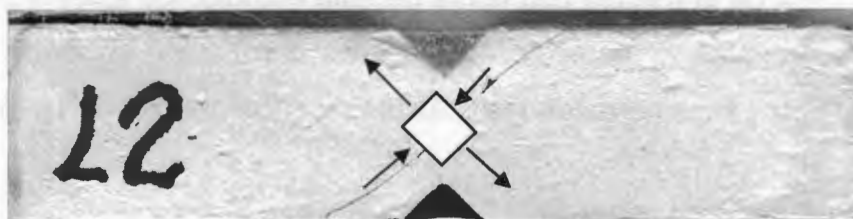


Figura 4.6. Grieta en probeta de mezcla sin fibras (L).

En probetas con fibras de la mezcla F de este estudio, la carga de cortante generó una grieta vertical de muesca a muesca en el centro de las probetas (Figura 4.7). Van Zijl reportó grietas verticales de muesca a muesca en probetas losipescu, en concreto con el 2,5 % de fibras [47].



Figura 4.7. Grieta vertical de probeta con fibras de carbón de este estudio.

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran micrografías de la zona de falla (a tensión) de una probeta con fibras. La Figura 4.8 muestra concentración de fibras (falta de dispersión) una posible causa de falla, el aumento de x250 permite observar las fibras de 5 μm de diámetro. El aumento x3500 (Figura 4.9) permite observar la fibra embebida en la matriz cementicia. La superficie de falla no tuvo tratamiento.

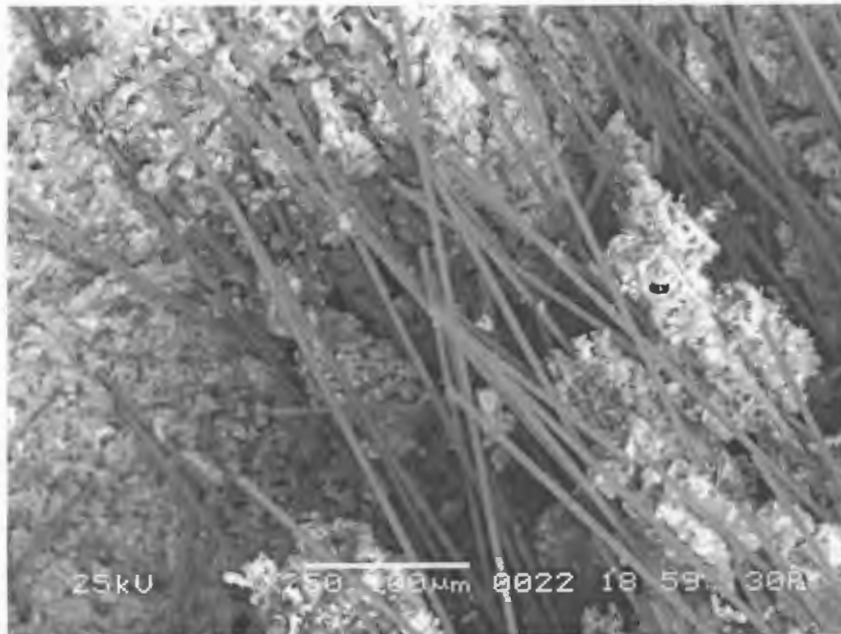


Figura 4.8. Micrografía obtenida en este estudio de zona de falla de pasta de cemento con 1% de fibras de carbón.

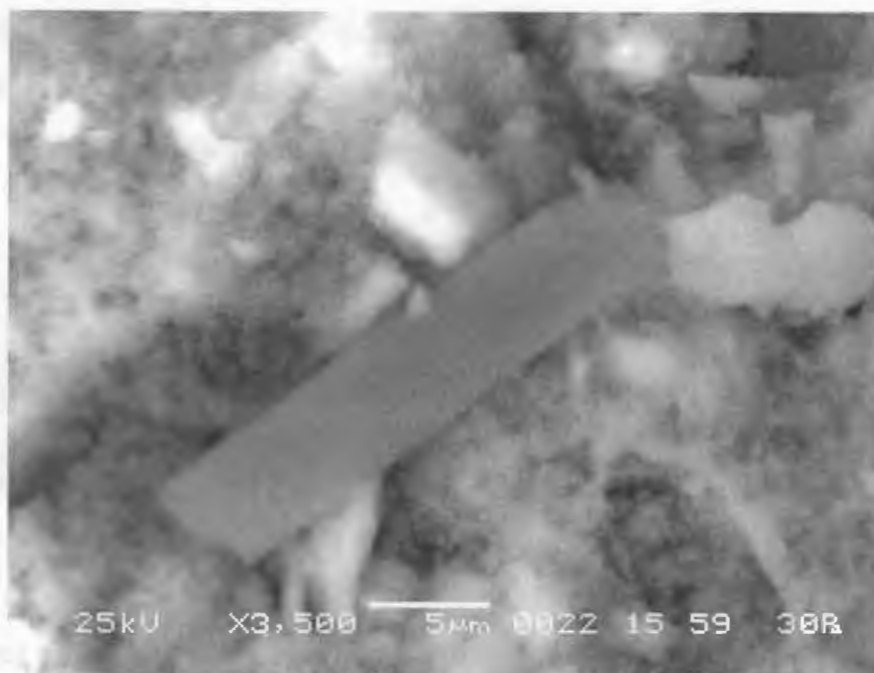


Figura 4.9. Micrografía de este estudio con 1% de fibra de carbón embebida en matriz cementicia.

Es evidente que las muestras elaboradas con cemento y látex todavía muestran un comportamiento frágil, a diferencia de aquellas que fueron elaboradas con fibras de carbón. La inclusión de dichas fibras modifica el comportamiento del material y su modo de falla ante fuerzas de cortante indica un comportamiento tipo "dúctil", aunque estrictamente dicha ductilidad no es la que se observa en materiales como los metales.

Es evidente que existe un intervalo de propiedades en los cuales la geometría y el modo de carga sugerido en el método losipescu, es mejor para su posible uso como sensor.

Por otra parte, en el diseño de un sensor normalmente se consideran intervalos de aplicación, es decir, que una formulación de material y una geometría podrían ser utilizados en determinadas aplicaciones y en un rango de carga. Asimismo, dado que un sensor debe de tener una vida larga, el material se diseñaría para que los esfuerzos que resista no sean mayores que un valor límite, quizás un 50-60% de su resistencia última, pero no hasta la falla como se realizó en este estudio.

Dado que la formulación con fibras de carbón presenta una falla por cortante, la relación de fuerza entre área propuesta para el método losipescu es todavía válida.

En este estudio, se observó que las formulaciones con cemento y látex fallan por los esfuerzos normales y por lo tanto se está reportando un valor de cortante promedio, pero el modo de falla no lo es.

4.2. Conductividad eléctrica de cemento con fibras de carbón.

Las fibras de carbón añadidas a la pasta de cemento aumentan la conductividad eléctrica. La Figura 4.10 presenta la conductividad eléctrica de la mezcla con fibras de carbón (F) de probetas losipescu y cúbicas; de este estudio. En las probetas prismáticas de la mezcla con fibras (F) el flujo se aplicó a través de los ejes X_1 , X_2 y X_3 ; en los cubos de 51 mm se determinó la conductividad a lo largo de un eje. El flujo a través del eje X_1 presentó la mínima conductividad y el rango más bajo (mezcla homogénea). En este estudio, los cubos se consideran los valores más representativos de la conductividad por su regularidad geométrica. La mayoría de los valores de conductividad de este estudio fueron mayores que el germanio (1 S/m). Banthia reportó conductividades (a 1, 7 y 28 días): 1 ; $3,3 \cdot 10^{-1}$ y $1,3 \cdot 10^{-1}$ S/m para 1% de fibras en volumen; y 3,33, 1,0 y $2,5 \cdot 10^{-1}$ S/m para 3% de fibras, respectivamente; la conductividad disminuye al aumentar la edad y aumenta al aumentar el porcentaje de fibras [75]. Chung reportó conductividad de $1,25 \cdot 10^{-1}$ y $5 \cdot 10^{-2}$ S/m para pasta de cemento con dióxido de silicio y látex, respectivamente [75]. La conductividad de este estudio (con 1% en masa de cemento) presentó valores mayores que los reportados en la literatura y presentó una conductividad mayor que el germanio (semiconductor). Las diferencias de la conductividad eléctrica de los ejes podría explicarse por las áreas (tintura de plata) donde se aplica el flujo eléctrico; las áreas para los ejes X_1 , X_2 y X_3 fueron 250, 165 y 119 mm², respectivamente; se cumple que a mayor área, menor conductividad eléctrica; pero no se cumple con el cubo de referencia ya que este tiene 2500 mm². Analizando el efecto de la longitud del recorrido del flujo en la

conductividad eléctrica; tenemos que las longitudes a través de los ejes X_1 (espesor), X_2 (eje longitudinal) y X_3 (muescas) son: 9,4 75,0 y 13,0 mm respectivamente; la longitud del cubo es 50 mm; se cumple parcialmente que a mayor longitud de recorrido del flujo mayor conductividad; para los ejes X_1 , el cubo y X_2 respectivamente, pero esto no se cumple para el eje X_3 (la muesca), aunque el área de este eje no es perpendicular al flujo eléctrico, en contraste los ejes que cumplen la relación tienen las áreas perpendiculares a los flujos eléctricos. El efecto de la longitud del recorrido del flujo eléctrico fue reportado por Banthia et al., quienes observaron que a mayor longitud de recorrido se obtuvo mayor conductividad, sin determinar las causas [75].

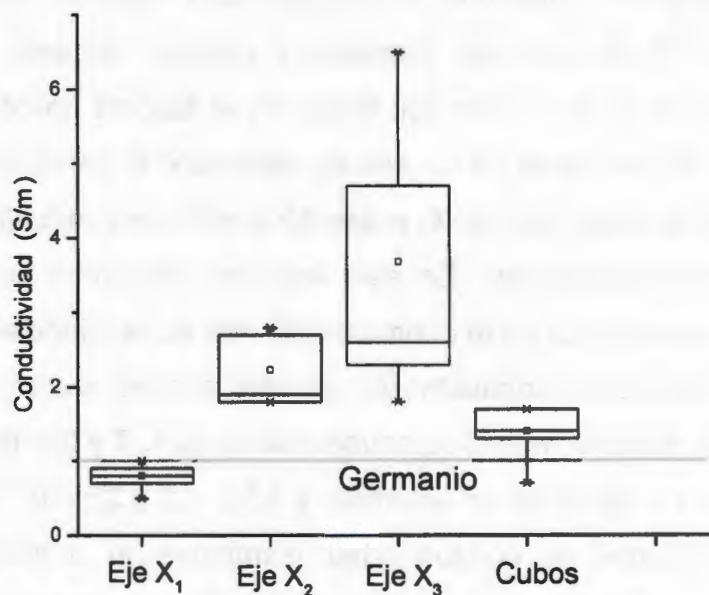


Figura 4.10. Conductividad de cemento con fibras de carbón a través de tres ejes ortogonales. La línea horizontal indica la conductividad del germanio (1 S/m).

La Figura 4.11 presenta una escala de conductividad [68], las flechas hacia arriba señalan conductividad de la pasta de cemento en estado seco (1); en estado húmedo (2); de la fibra de carbón (3). Las flechas hacia abajo señalan la conductividad del cemento con fibras reportado en la literatura (4); y la conductividad obtenida en este estudio (5).

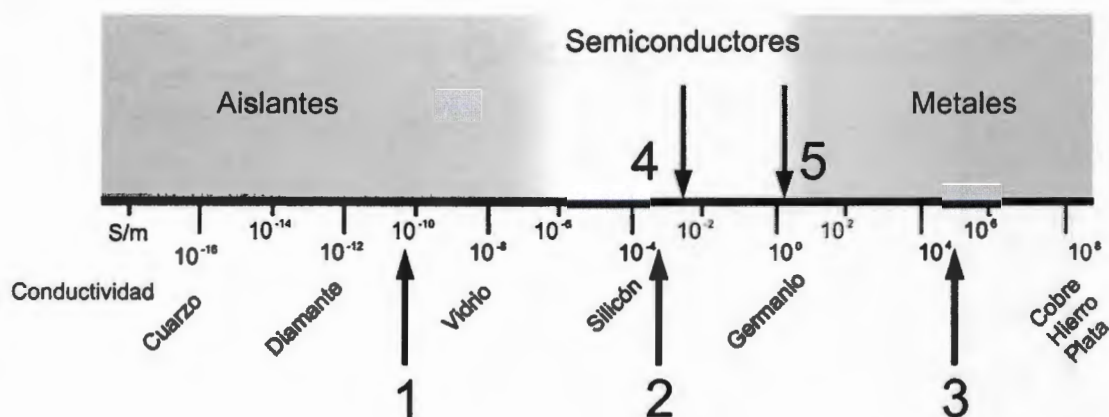


Figura 4.11. Conductividad eléctrica de componentes y de cemento con fibras.

La Figura 4.12 presenta una curva de aumento de la conductividad eléctrica por el aumento del porcentaje de fibras (en masa de cemento) [99]. El material sin fibras, muestra dos conjuntos de datos que corresponden a la pasta de cemento con látex (mínimos valores) y sin látex (pasta de cemento); la mezcla con látex tuvo la mínima conductividad debido a la naturaleza aislante del copolímero. A partir del 1% de fibra se observa un aumento de 7 órdenes de magnitud de la conductividad. En el nivel 3% de fibras se observa una disminución de la conductividad, probablemente por la falta de trabajabilidad de la mezcla y como consecuencia la falta de dispersión de las fibras. Al nivel del 4% se observan valores mixtos: 1) un aumento; y 2) una disminución de la conductividad. Sun *et al* reportó un punto de percolación a un nivel de 1,2% (en masa) de fibras de carbón de $25,0 \times 10^{-5}$ ohm·m de resistividad (conductividad de 4×10^3 S/m) y $7 \mu\text{m}$ de diámetro [77]. Para los porcentajes usados en la mezcla de la Figura 4.12 se observa que el flujo eléctrico percola a partir del 1% de fibra de carbón (en masa) debido al incremento de la conductividad eléctrica.

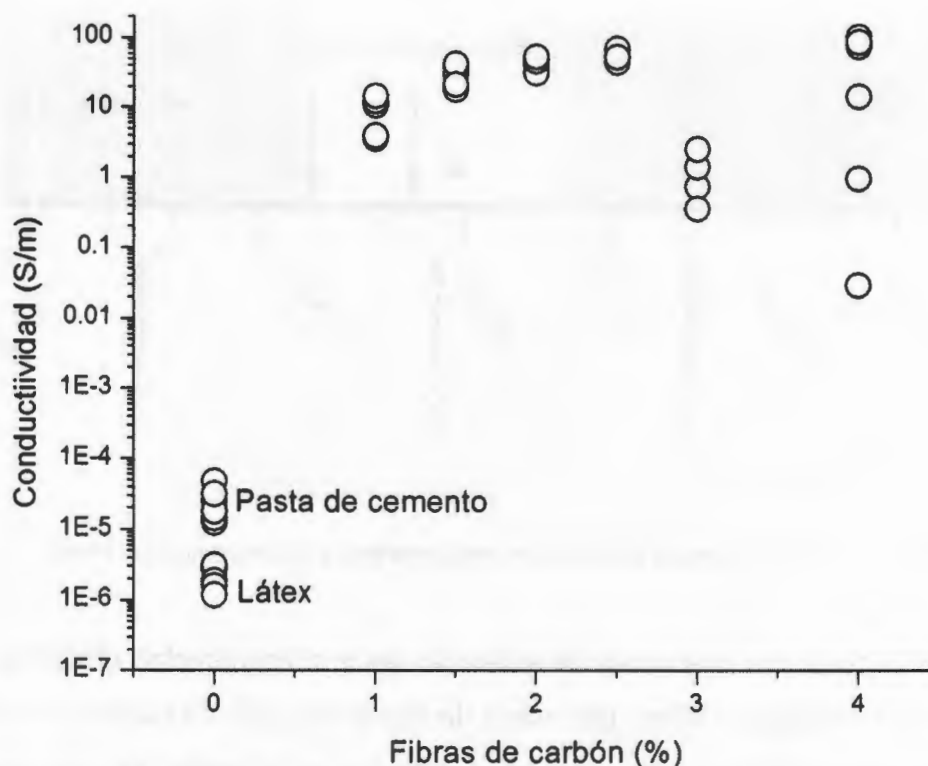


Figura 4.12. Curva de percolación eléctrica de pasta de cemento (P), de cemento con látex (L) y fibras de carbón (% en masa) [99].

4.3. Variabilidad de resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_o).

La Figura 4.13 compara la variación de la resistencia eléctrica en los tres ejes ortogonales (dos mediciones para cada eje; 60 y 180 s), a diferencia de la Figura 4.10 relativa a la conductividad eléctrica del material, esta medición sirvió para determinar la dispersión de los valores de la resistencia eléctrica, sin el efecto de la carga mecánica o intervalo donde se ubicó la R_o (resistencia inicial para calcular el cambio fraccional $\Delta R/R_o$); además para determinar si existía cambio en dos días consecutivos. Para flujo en el eje X_1 , se observa el mismo promedio y rango en las dos mediciones; análogamente para los otros ejes. El promedio y rango máximos correspondió al eje X_2 (trayectoria más larga del flujo eléctrico 76 mm). Las resistencias de los ejes X_1 y X_3 (trayectorias cortas) presentaron promedios similares; el rango del eje X_3 fue un poco mayor.

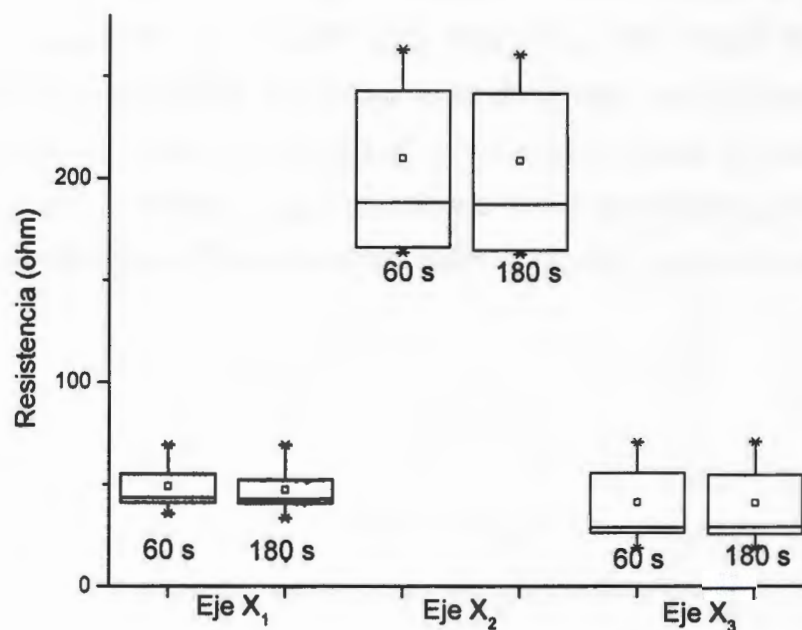


Figura 4.13. Promedios y variación de la resistencia eléctrica sin carga mecánica (R_0) en cada uno de los ejes ortogonales, en dos mediciones durante 60 y 180 s.

La Figura 4.14 muestra el área central con tintura de plata de una probeta de la mezcla con fibras (F), el flujo eléctrico se aplicó a través del eje X_1 (a través del espesor de 10 mm); a la izquierda se observa un cable de conexión para medir la resistencia eléctrica.

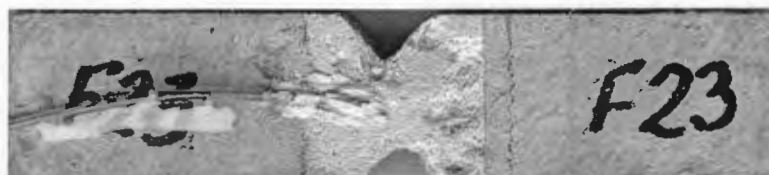


Figura 4.14. Superficie de aplicación del flujo eléctrico en el eje X_1 .

La Figura 4.15 presenta la resistencia eléctrica de las probetas, en la primera medición durante 180 s a través del eje X_1 . La resistencia mínima de seis probetas fue 35,78 ohm y la máxima de 69,34 ohm, una diferencia de 33,56 ohm. En esta escala, los valores de la resistencia eléctrica para cada probeta se observan constantes, no se observa el fenómeno de “resistencia a la polarización”

(aumento de la resistencia eléctrica) observado en pasta de cemento [76]. La razón de esta Figura es para notar que cuando no hay carga mecánica la resistencia eléctrica para cada probeta es constante en esta escala, para cada una de las probetas. Si existe el fenómeno de piezorresistividad eléctrica, cuando se aplique la carga mecánica, como consecuencia, la resistencia eléctrica debe de cambiar y dejar de ser constante, a partir del momento de aplicación de la carga.

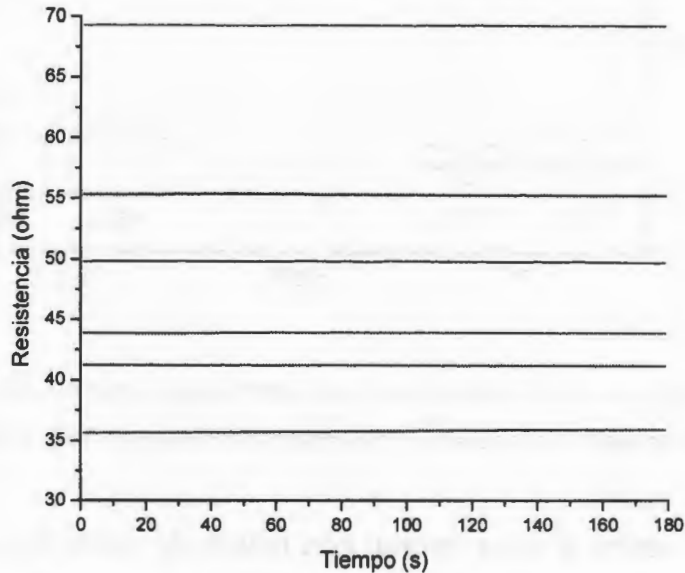


Figura 4.15. Evolución de la resistencia eléctrica en la primera medición durante 180 segundos, eje X_1 .

Sin embargo, para observar la variación de la resistencia eléctrica de una probeta individual con más detalle, la Figura 4.16 presenta la evolución de la resistencia eléctrica de una las probetas de la Figura anterior con flujo a través del eje X_1 , que en la primera medición tuvo un rango de 0,08 ohm, se observa una tendencia de la resistencia eléctrica a disminuir (aumento de flujo eléctrico), como efecto contrario al fenómeno de “resistencia a la polarización” (de materiales aislantes o dieléctricos); un ajuste lineal arroja una pendiente negativa $3,16E-4$ ohm/s con $R^2=0,76$. Este aumento de flujo eléctrico o mejor conducción podría deberse a la formación de nuevas rutas para el paso de los electrones a través del material o debido a un mejor desempeño de las rutas eléctricas existentes que podrían

aumentar su capacidad para transportar mayor flujo eléctrico en función del tiempo. Esta Figura ayuda a determinar el valor de R_0 (resistencia eléctrica inicial), descartando la elección de la primera medida obtenida, ya que con este gráfico se demuestra que deberá elegirse la R_0 en el momento justo que corresponda a la aplicación de la carga. La tendencia a la disminución de la resistencia eléctrica se presentó en todas las probetas, en todos los ejes.

La Figura 4.16 presenta la evolución de la resistencia eléctrica de una probeta con flujo a través del eje X_1 que en la primera medición tuvo un rango de 0,08 ohm, se observa tendencia a disminuir (aumento de flujo eléctrico), como efecto contrario al fenómeno de “resistencia a la polarización” (de materiales aislantes o dieléctricos); un ajuste lineal arroja una pendiente negativa $3,16E-4$ ohm/s con $R^2=0,76$. La Figura 4.17 presenta el histograma de la resistencia eléctrica correspondiente a la segunda medición de 60 s; el rango en las dos mediciones fue de 0,08 ohm; se superpuso una curva normal con coeficiente de correlación R^2 de 0,816. La tendencia a la disminución de la resistencia eléctrica se presentó en todas las probetas, en todos los ejes.

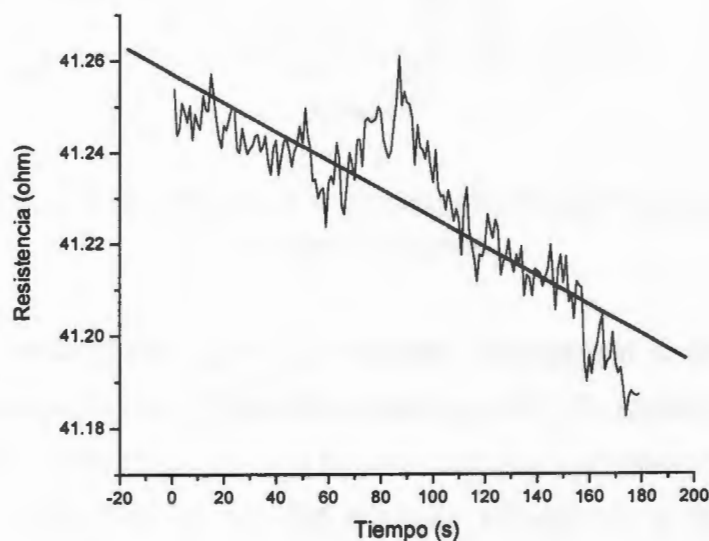


Figura 4.16. Evolución de resistencia eléctrica de una probeta del eje X_1 , durante 180 s, en la primera medición.

Para observar el intervalo de variación de la R_o (resistencia eléctrica sin carga), la Figura 4.17 presenta un histograma de la resistencia eléctrica que corresponde a la segunda medición (con duración de 60 s) de una de las probetas de la Figura 4.15. El rango en las dos mediciones fue de 0,08 ohm; se superpuso una curva normal con coeficiente de correlación R^2 de 0,816. Sin embargo, debido a la tendencia de la resistencia eléctrica a disminuir, este intervalo de variación de la R_o puede aumentar en función del tiempo, aunque de manera mínima según se observa de la pendiente del párrafo anterior. De lo anterior la R_o o resistencia inicial deberá tomarse justo en el momento de la aplicación de la carga mecánica.

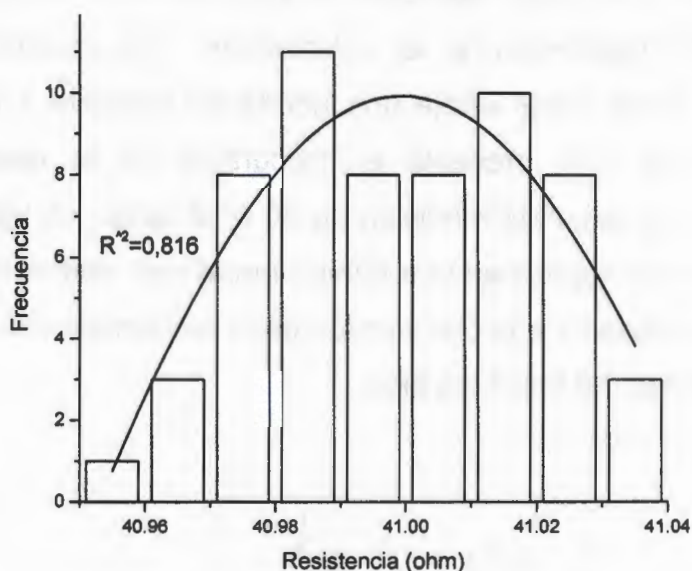


Figura 4.17. Histograma de la resistencia eléctrica, de la probeta de la anterior, de la segunda medición durante 60 s.

4.4. Evolución de la resistencia eléctrica y la carga de cortante.

4.4.1. Campo eléctrico E_1 y flujo a través del eje X_1 (régimen elasto-plástico).

La Figura 4.18 muestra la evolución de una probeta sometida a carga cortante (N) y la evolución de la resistencia eléctrica (R). Se observa que a medida que la carga (N) aumenta, la resistencia (R) aumenta hasta la carga máxima (pico). Después de la carga máxima, a la disminución de la carga (N) le corresponde un aumento de la resistencia eléctrica. Después del primer pico en la curva R se forma una zona que corresponde a la detención de la carga y a la descarga.

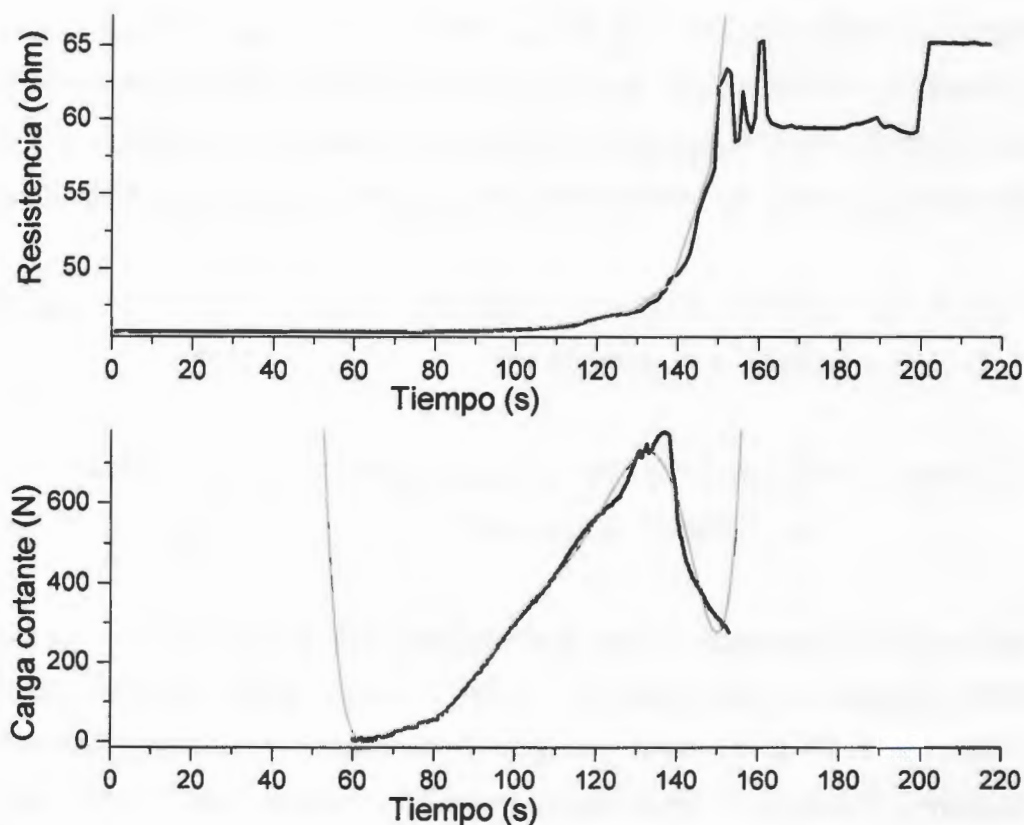


Figura 4.18. Evolución de la resistencia eléctrica (R) y de la carga (N) de una probeta con flujo en el eje X_1 , con ajustes polinomiales de grado 9.

En la Figura 4.18, la curva de resistencia eléctrica R presenta tres zonas: 1) zona “inicial” de comportamiento “no-lineal” hasta el primer pico (corresponde a la zona de aumento y disminución de carga de la curva N); 2) zona “irregular” con tres picos (comienza con la detención de la carga N); y 3) zona “final” con dos regiones de resistencia eléctrica constante (que corresponde a la descarga). La curva N presenta un comportamiento de “suavizamiento por deformación” según ASTM C 1018 [34], este comportamiento es similar al presentado por elementos sometidos a flexión; consiste en dos zonas: 1) aumento de carga hasta la carga última o máxima (τ_u); y la zona de “disminución”. Generalmente la primera grieta y la carga última están muy cercanas. La aplicación de la carga mecánica de cortante comenzó 60 segundos después del comienzo de la medición de la resistencia

eléctrica; por tal motivo se observa en las curvas una zona inicial de valor constante. La carga mecánica se detuvo 15 s después de la carga máxima; la carga “residual” fue mantenida por la máquina universal (con ligera disminución) hasta la activación de la descarga. Ajustes polinomiales se ajustaron para R (hasta el primer pico) y para N, en función del tiempo, se dan las fórmulas a continuación:

$$R = 46 + 0,037t - 0,006t^2 + 4,625E-4t^3 - 1,769E-5t^4 + 3,868E-7t^5 - 5,01t^6 + 3,798E-11t^7 - 1,554E-13t^8 + 2,652E-16t^9 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$N = 2,215E6 - 200106,63t + 7877,07t^2 - 177,10t^3 + 2,50t^4 - 0,023t^5 + 1,376E-4t^6 - 5,138E-7t^7 + 1,083E-9t^8 - 9,771E-13t^9 \dots\dots\dots (4.2)$$

La Figura 4.19 corresponde a otra probeta con flujo a través de X₁. La curva R (superior) presenta cuatro zonas: 1) “inicial” con una zona constante (sin carga mecánica) hasta 70 s; 2) zona con pendiente poco pronunciada hasta 100 s, corresponde a la aplicación de la carga, hasta la primera grieta; 3) zona “no-lineal” con considerable aumento de pendiente (corresponde a la zona después del primer pico de N, de disminución de carga); 4) zona “constante” corresponde a la detención de carga. En la curva N (inferior) se observan tres zonas: 1) comportamiento “lineal” hasta 115,4 s que incluye la “primera grieta”; 2) una zona “no lineal” hasta la carga última con un pequeño pico; y 3) zona de “disminución” de carga, con cierta curvatura. Después de la detención de carga mecánica, la máquina universal mantuvo el nivel de carga hasta que se activó la descarga, esto generó una zona en la curva R en forma de “meseta” con valor constante, con ligera tendencia a disminuir. Otras dos probetas presentaron comportamientos similares.

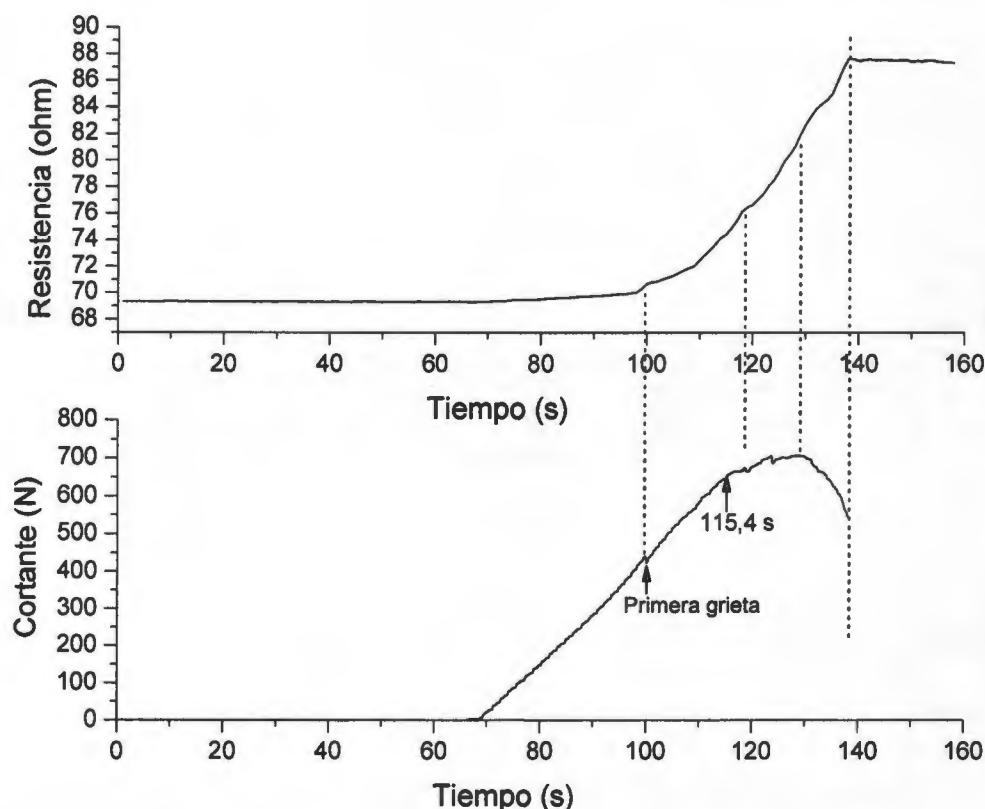


Figura 4.19. Evolución de las curvas R y N (a la falla).

La Figura 4.20 muestra la evolución de las curvas R y N de una probeta con flujo a través de X_1 . La curva R presenta 6 zonas: 1) "inicial", con R constante (sin carga mecánica); 2) "aumento" de pendiente (corresponde al aumento de N); 3) "máximas pendientes" con comportamiento lineal hasta el primer pico (corresponde a la disminución de N); 4) "máximos valores de R" (comienza con la detención de la carga) con ligera tendencia a la disminución; 5) "disminución abrupta" de R (corresponde a la descarga) termina con una resistencia de 38,67 ohm valor similar al inicio de la zona de máximas pendientes de 38,69 ohm (inicio de la descarga); 6) "residual" con R constante de 38,67 ohm (sin carga mecánica) mayor que la R inicial (no se recuperó el valor inicial porque hubo agrietamiento). La Tabla 4.2 resume comportamientos de R y N. En la curva N se observa un "primer pico" a 110 s (corresponde a un pico de R donde disminuye la pendiente).

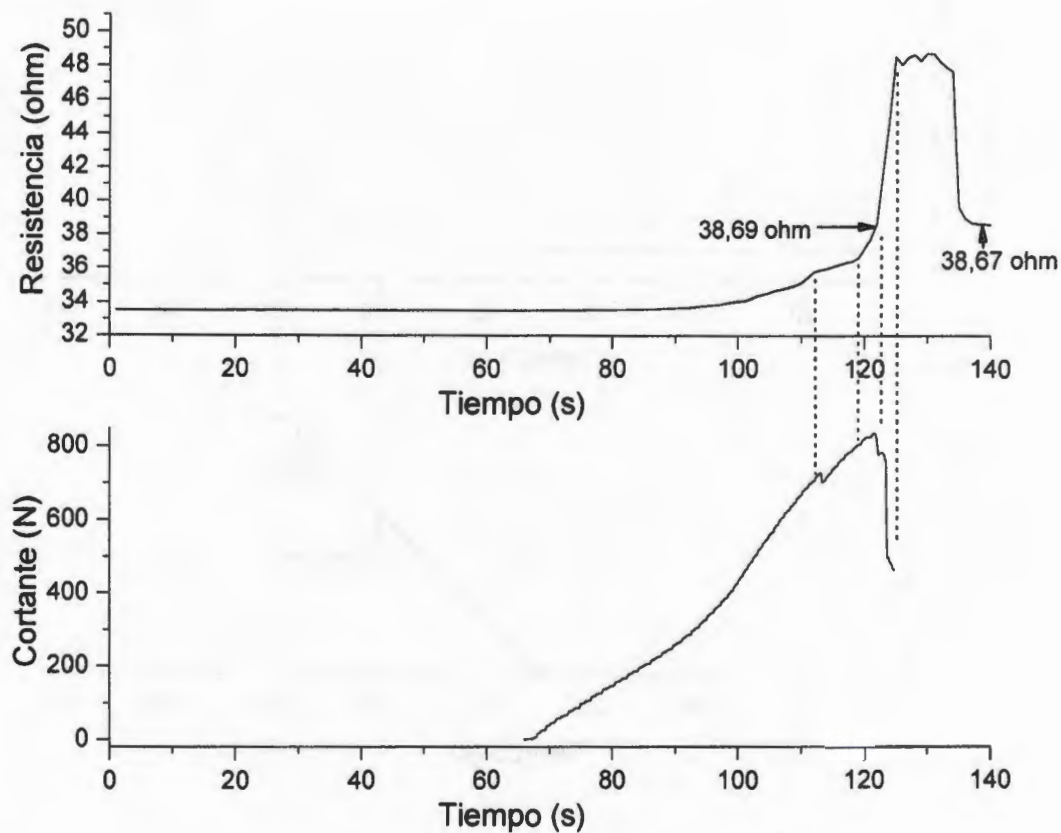


Figura 4.20. Evolución de las curvas R y N para flujo en X_1 (a la falla).

Tabla 4.2. Correspondencia de zonas R y N.

Zona	R	N
1	"constante"	Sin carga
2	"Aumento"	Aumento de N
3	"Máximas pendientes"	Disminución de N
4	"Máximos valores"	Detención de carga
5	"Disminución abrupta"	Descarga
6	"Residual"	Sin carga

4.4.2. Campo eléctrico E_1 y flujo a través del eje X_1 (hasta 300 N, régimen elástico).

Este análisis hasta 300 N de las probetas con flujo en X_1 , es con el fin de comparar resultados con los ejes X_2 y X_3 . Es un análisis parcial de los datos del inciso anterior que se limita hasta 300 N, carga máxima que se aplicó a las probetas de los ejes X_2 y X_3 que no llegaron a la fractura. La Figura 4.21 presenta la evolución de las curvas R y N. Se observa un comportamiento lineal de R y N; un incremento de 0,5 ohm corresponde un incremento de 300 N (1 ohm para 600 N si se mantiene lineal). La Figura 4.22 muestra la evolución de las curvas R y N de otra probeta; R presenta un comportamiento no-lineal, mientras que la curva N es lineal. Un incremento de 0,25 ohm, le corresponde a un incremento de carga de 300 N, esta sensibilidad es menor que en la probeta anterior.

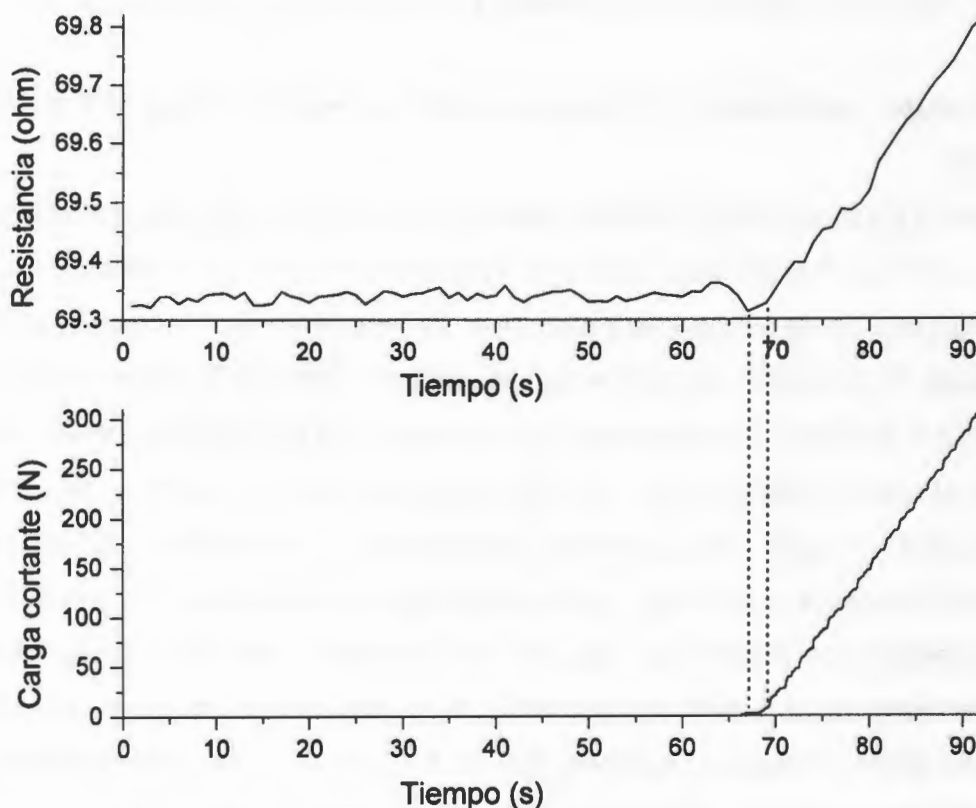


Figura 4.21. Evolución de R y N (hasta 300 N), flujo a través de X_1 .

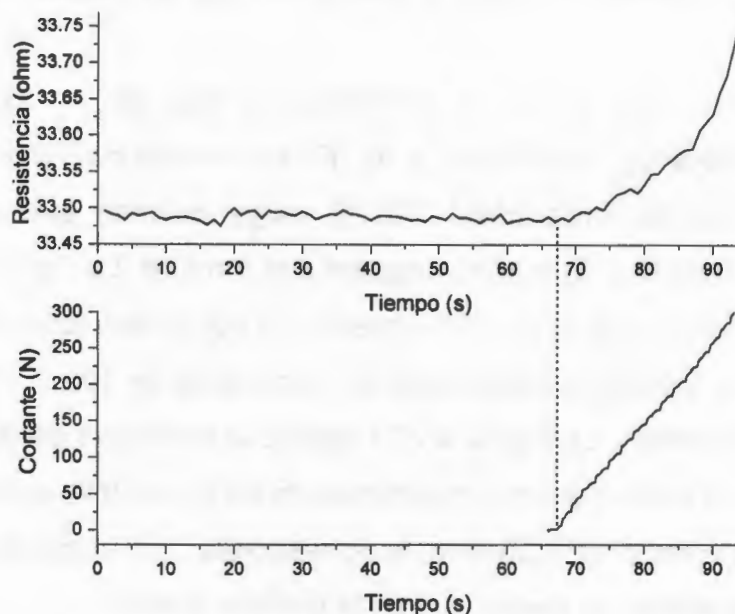


Figura 4.22. Evolución de las curvas R y N (hasta 300 N), flujo a través de X_1 .

4.4.3. Campo eléctrico E_2 y flujo a través del eje X_2 (hasta 300 N, régimen elástico).

La Figura 4.23 presenta la evolución de las curvas R y N, de una probeta con flujo a través de X_2 (longitudinal). La curva R presenta 5 zonas: 1) "inicial" (sin carga mecánica) con ligera tendencia a disminuir; 2) "aumento" (por incremento de carga mecánica); 3) "meseta" comienza con el valor máximo de R (pico), y tiene ligera tendencia a disminuir (corresponde a la detención de la carga; la meseta se forma porque el equipo mantuvo el nivel de carga de 300 N hasta la descarga); 4) "disminución abrupta" (corresponde a la descarga); 5) "residual" con tendencia a disminuir (sin carga mecánica); esta resistencia residual es mayor que la R inicial; un comportamiento similar fue reportado en probetas a tensión y compresión [63]. Un incremento de 1,5 ohm correspondió a un incremento de carga de 300 N (1 ohm para 200 N) mayor sensibilidad que en flujo en X_1 (1 ohm para 600 N). Todas las probetas del eje X_2 presentaron comportamiento similar, a excepción de la probeta de la Figura 4.24, que presentó alta inestabilidad de R (rango máximo de 0,15 ohm sin carga mecánica). En la curva N la carga mecánica no fue registrada por la máquina universal a partir de la detención de la prueba.

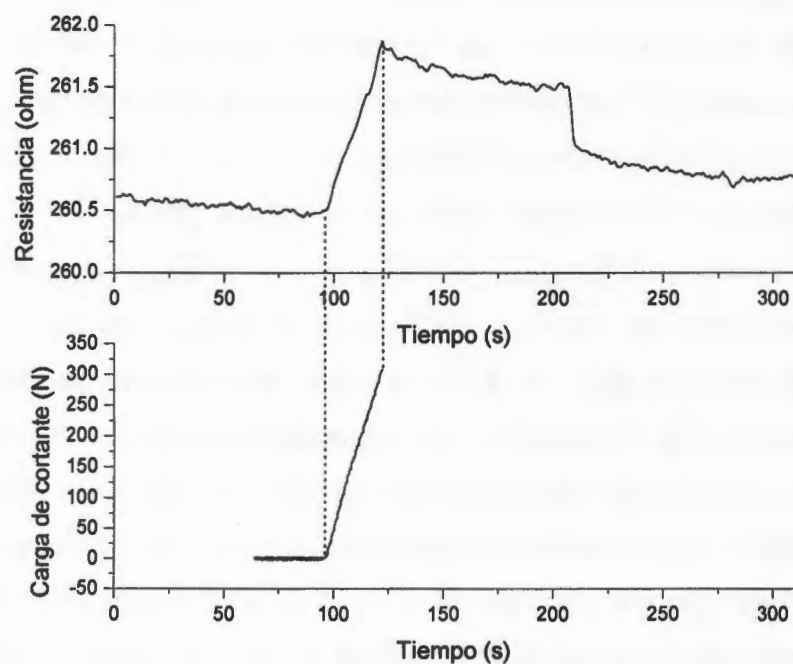


Figura 4.23. Evolución de las curvas R y N de probeta con flujo a través de X_2 .

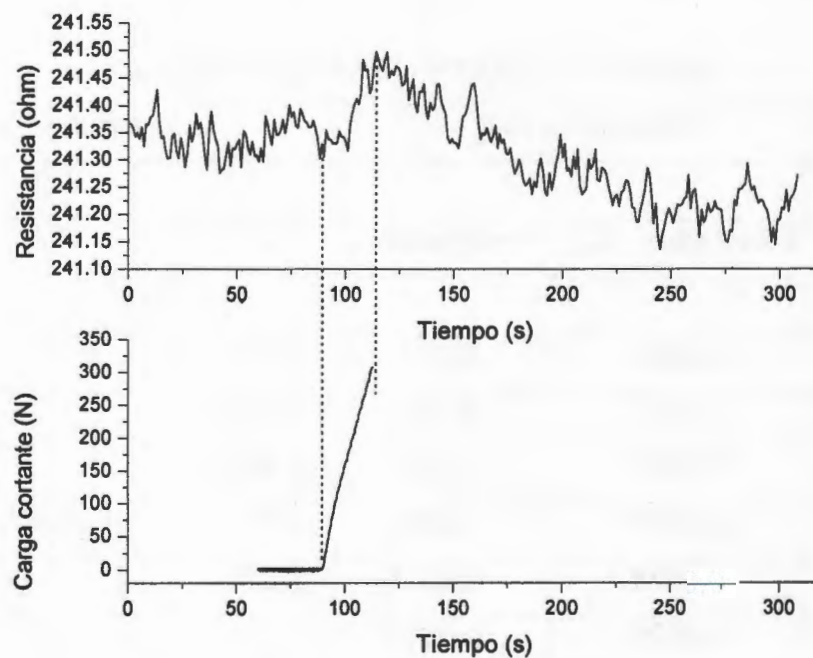


Figura 4.24. Evolución de las curvas R y N de una probeta muy inestable.

Chen y Chung analizaron tres ciclos de carga y descarga en probetas sometidas a tensión mecánica, observaron 3 comportamientos de $\Delta R/R$: 1) "incremento irreversible" en la porción inicial de la primera carga (por debilitamiento de la interfase fibra-matriz); 2) "incremento reversible" en la última porción de la primera carga y cargas subsecuentes (por apertura de grieta); 3) "disminución reversible" durante la descarga en cualquier ciclo (por cierre de grieta). En la Tabla 4.3 se presentan fracciones $(\Delta R/R_o)_{\text{reversible}}/(\Delta R/R_o)_{\text{fractura}}$ y $(\Delta R/R_o)_{\text{irreversible}}/(\Delta R/R_o)_{\text{fractura}}$; a diferentes amplitudes de esfuerzo de tensión (máximo esfuerzo aplicado entre esfuerzo en la fractura) [63]; en la última columna se reporta la relación entre la región "reversible" y la "irreversible" de esfuerzos de cortante de este estudio, la mayoría de los valores fue mayor que uno (mayor la parte reversible); predominó la parte reversible para un esfuerzo de cortante del 40 % de la carga de ruptura, la referencia [63] estudió cargas entre el 20 y 75% de la carga de fractura (primera columna) la parte reversible predominó hasta el 33% de la carga de fractura bajo cargas de tensión mecánica. En este estudio el predominio de la parte reversible bajo cargas de cortante se mantuvo en el 40% de la carga de ruptura, debido a que todos los valores de R_e/I_r son mayores que uno.

Tabla 4.3. Fracciones $(\Delta R/R_o)/(\Delta R/R_o)_{\text{fractura}}$

Referencia [63]				Este estudio (cortante)
$\sigma_{\text{max}}/\sigma_u$				0,40
	Reversible (R_e)	Irreversible (I_r)	R_e/I_r	R_e/I_r
0,75	0,039	0,244	0,16	
0,65	0,037	0,102	0,36	
0,50	0,032	0,115	0,28	
0,40	0,0073	0,068	0,11	1,26-9,67
0,33	0,0034	0,0015	2,27	
0,25	0,0025	0,0013	1,92	
0,20	0,0027	0,0017	1,59	

4.4.4. Campo eléctrico E_3 y flujo a través del eje X_3 (hasta 300 N, régimen elástico).

La Figura 4.25 presenta las mismas zonas que la Figura 4.23 del eje X_2 . La curva R presenta las siguientes zonas: 1) "inicial" (sin carga mecánica); 2) zona de "aumento" de R (por aumento de carga mecánica); 3) "meseta" que inicia con valor máximo de R (primer pico) y con tendencia a disminuir (corresponde a la detención y mantenimiento de la carga); 4) "disminución abrupta" de R (por descarga); 5) "residual" (sin carga mecánica), pero no se recuperó el valor inicial de R; la R "residual" fue mayor en 0,1 ohm que la R inicial; se observa una tendencia a disminuir. Las zonas de aumento de las curvas R y N presentan comportamientos lineales. Un incremento de 0,50 ohm se generó por incremento de carga de 300 N (1 ohm para 600 N) similar al comportamiento del eje X_1 . La Figura 4.26 muestra la evolución de las curvas R y N de una probeta, con comportamiento similar a la Figura 4.23. Al comienzo de la descarga R- R_0 fue 0,40 ohm y a 600 s, la diferencia fue 0,30 ohm. En la zona de aumento de la curva N se observan dos pendientes; el aumento de pendiente se observa a 130 s, este aumento generó también un aumento de pendiente en la curva R.

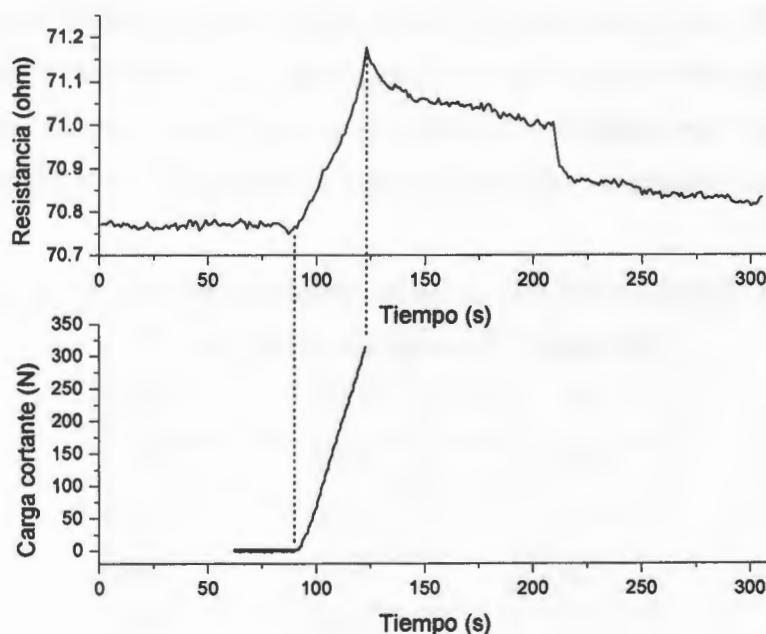


Figura 4.25. Evolución de las curvas R y N, de flujo a través del eje X_3 .

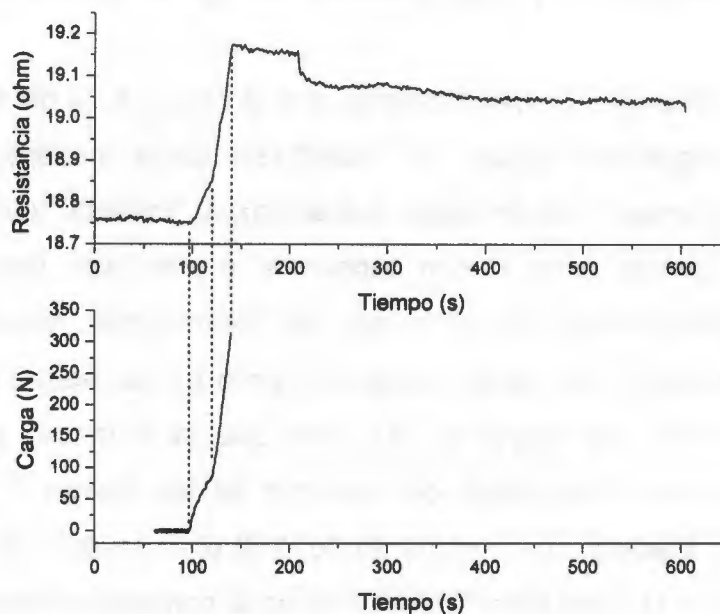


Figura 4.26. Evolución de las curvas R y N, de otra prueba a través del eje X_3 .

Análogamente al eje X_2 , en la Tabla 4.4 se dan valores de la relación entre la región “reversible” y la “irreversible” de la resistencia eléctrica para el eje X_3 ; dos valores son menores que uno (mayor la parte irreversible); un valor es igual a uno (parte reversible igual que la parte irreversible); 3 valores fueron mayores que uno (mayor la parte reversible); en los porcentajes se observa el predominio del comportamiento reversible en la mitad de las probetas, pero no en su totalidad como en el caso del eje X_2 donde en todas se presentó el predominio de la parte reversible.

Tabla 4.4. Relación entre la parte reversible e irreversible de R, eje X_3 .

Probeta	Reversible/Irreversible	%
F4	1,75	64
F10	2,00	67
F11	0,47	32
F19	1,00	50
F22	1,50	60
F24	0,17	14

4.5. Acoplamiento piezorresistivo.

4.5.1. Piezorresistividad a través del Eje X_1 hasta la fractura.

Las probetas con flujo eléctrico a través del eje X_1 (espesor) fueron sometidas a un nivel del esfuerzo cortante que rebasó el esfuerzo último (τ_u). Para estudiar el "Acoplamiento piezorresistivo" bajo esta condición se elaboró una gráfica que relaciona el esfuerzo cortante (τ) en MPa y la "Variación fraccional" ($\Delta R/R$) la cual es adimensional. En todas las gráficas se observaron dos correlaciones (directa e inversa). La correlación directa se presenta hasta el máximo esfuerzo de cortante τ_u (o esfuerzo último); y la correlación inversa se presenta a partir de τ_u hasta que se detiene la aplicación de la carga mecánica. En la correlación directa se cumple que, el aumento del esfuerzo cortante produce un aumento de la resistencia eléctrica R y en consecuencia un aumento de la "Variación fraccional" $\Delta R/R$ que resulta positiva. En la correlación inversa se observa que, la disminución del esfuerzo cortante τ produce un aumento de la resistencia eléctrica R y en consecuencia un aumento de la "Variación fraccional" $\Delta R/R$ que resulta positiva. Las Figuras 4.27 y 4.28 muestran las correlaciones mencionadas de dos pruebas.

En la gráfica esfuerzo cortante (τ)-variación fraccional ($\Delta R/R$) de la Figura 4.27 se observa: 1) una zona de comportamiento lineal hasta un esfuerzo de 6 MPa; 2) una zona no-lineal después de este esfuerzo; 3) una "Primera grieta" al nivel de esfuerzo de 8,90 MPa que se presenta como un pico; 4) el esfuerzo último (τ_u) al nivel de esfuerzo de 9,41 MPa; 5) una zona de disminución del esfuerzo cortante a partir del esfuerzo último. La "Primera grieta" se menciona en el ASTM [34] para miembros sometidos a flexión y en la referencia [46]. En la Figura 4.28 se observa el fin de la linealidad a un nivel de esfuerzo de 5,0 MPa; la "Primera grieta" a un nivel de 8,06 MPa; y un esfuerzo último a 10,43 MPa.

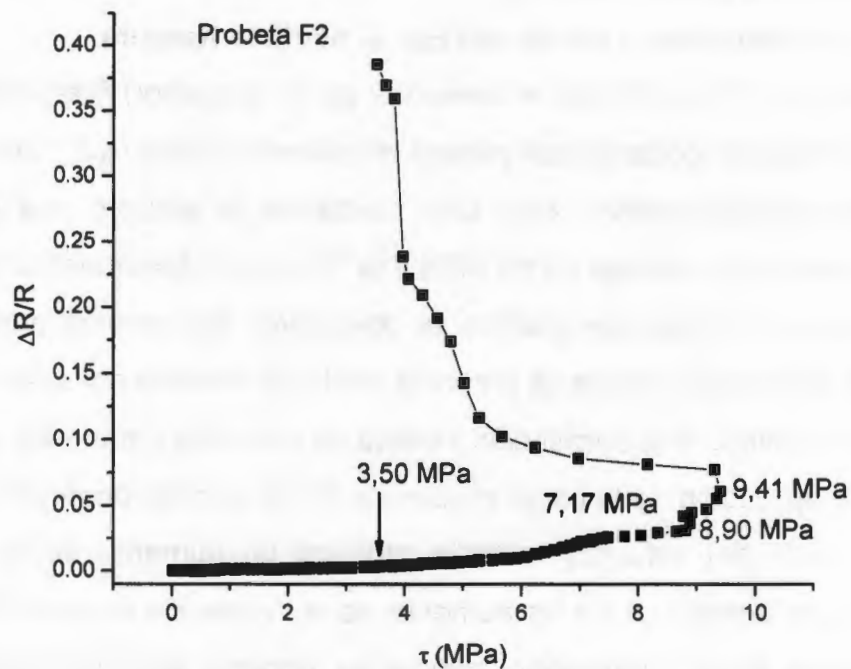


Figura 4.27. Correlación entre el esfuerzo τ y el cambio fraccional $\Delta R/R$ en prueba sometida a campo eléctrico E_1 en el eje X_1 a la falla.

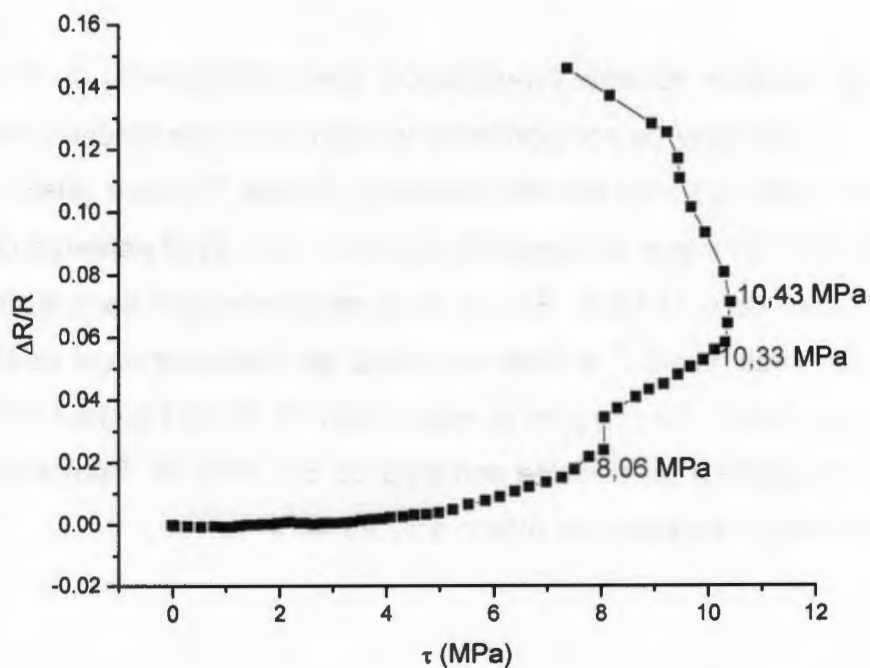


Figura 4.28. Correlación entre τ y $\Delta R/R$ de una prueba con flujo en el eje X_1 .

El Acoplamiento piezorresistivo para esta serie de pruebas se obtuvo mediante un ajuste hasta el esfuerzo último. La Figura 4.29 presenta un ajuste polinomial de grado 9 (de color gris) hasta τ_u con los datos de la prueba que corresponden a la Figura 4.28, se obtuvo un Coeficiente de correlación (R^2) de 0,99002. La Tabla 4.5 presenta polinomios de grado 9 para estimar la "Variación fraccional" ($\Delta R/R$) en función del esfuerzo cortante (τ), en la última columna de la Tabla se dan los coeficientes de correlación R^2 cuyo menor valor fue 0,97313 cercano a uno, lo cual significa que la curva de ajuste se aproxima bastante a las curva de los datos experimentales. Por otra parte, es posible determinar curvas de ajuste en la zona de disminución del cortante, con el fin de correlacionarlo con el ancho de grieta para un análisis de mecánica de la fractura, pero en este estudio no se midió el ancho de grieta.

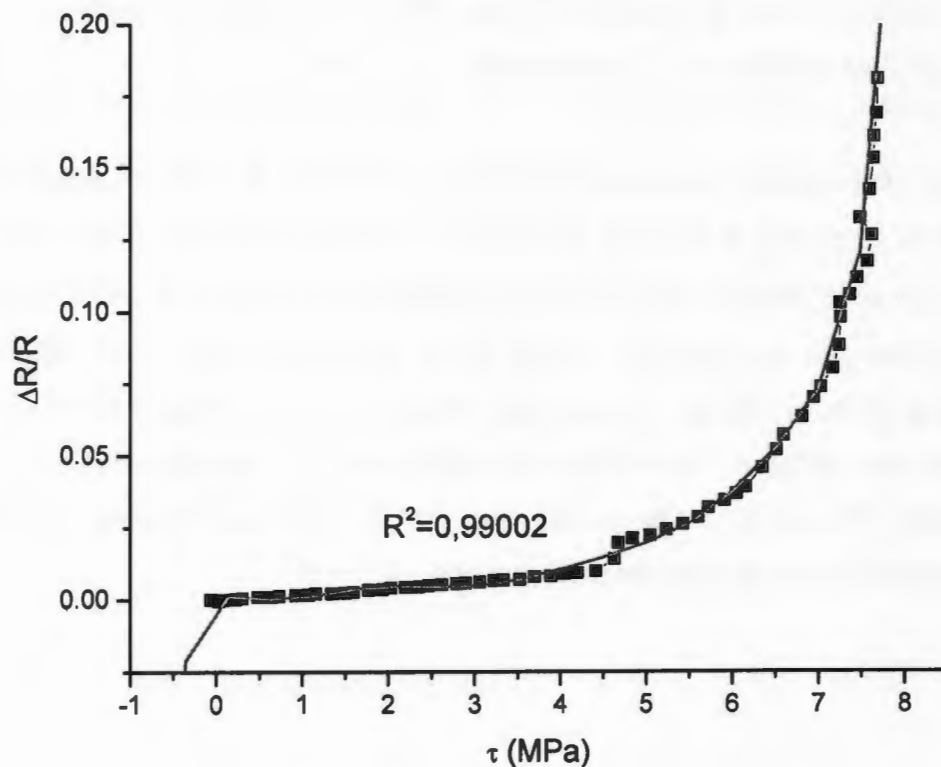


Figura 4.29. Ajuste polinomial entre τ y $\Delta R/R$ hasta τ_u de la Figura 4.28.

Tabla 4.5. Polinomios de grado 9 para estimar $\Delta R/R$ en función de τ .

	Fórmula $\Delta R/R =$	R^2
F2	$0,00103-0,01377\tau+0,03915\tau^2-0,04222\tau^3+0,02297\tau^4-0,00701\tau^5$ $+0,00125\tau^6-1,28367E-4\tau^7+7,05003E-6\tau^8-1,59517E-7\tau^9$	0,97313
F3	$-3,17933E-4+0,01853\tau-0,06945\tau^2+0,10151\tau^3-0,07233\tau^4+0,02866\tau^5-$ $0,00665\tau^6+8,98853E-4\tau^7-6,56682E-5\tau^8+2,00446E-6\tau^9$	0,99002
F16	$-2,4233E-4+0,00288\tau-0,01341\tau^2+0,01806\tau^3-0,01105\tau^4+0,00364\tau^5-$ $6,86979E-4\tau^6+7,40858E-5\tau^7-4,24206E-6\tau^8+9,98674E-8\tau^9$	0,99508
F20	$-4,8965E-4+0,01653\tau-0,05177\tau^2+0,05907\tau^3-0,03332\tau^4+0,01052\tau^5-$ $0,00195\tau^6+2,0898E-4\tau^7-1,2069E-5\tau^8+2,89775E-7\tau^9$	0,9952
F21	$3,99868E-4-0,01842\tau+0,06151\tau^2-0,07373\tau^3+0,04547\tau^4-0,01584\tau$ $^5+0,00324\tau^6-3,85787E-4\tau^7+2,4626E-5\tau^8-6,51533E-7\tau^9$	0,99354
F23	$-7,78826E-4+0,02078\tau-0,06154\tau^2+0,07355\tau^3-0,04429\tau^4+0,01503\tau^5-$ $0,00298\tau^6+3,42688E-4\tau^7-2,10813E-5\tau^8+5,36773E-7\tau^9$	0,99775

La Tabla 4.6 presenta la variación fraccional $\Delta R/R$ a la fractura reportada en la literatura de probetas a tensión, compresión y flexión [63], así como la variación obtenida en este estudio para cortante. La variación fraccional $\Delta R/R$ a la fractura para cortante con respecto a τ_u varió entre 0,061 a 0,181; éstos valores están cercanos a lo reportado en la literatura para la mezcla de látex con 0,53% de fibra de carbón (en volumen) sometida a tensión mecánica; también están cercanos a la variación fraccional de la misma mezcla de látex con 0,35% de fibras (en volumen) de la zona de tensión en la prueba de flexión.

Tabla 4.6. Variación fraccional $\Delta R/R$ a la fractura.

		[63]			Flexión [63]
F, %vol	1*		0,24	0,53	0,35
Carga	Cortante		Compresión	Tensión	Compresión/Tensión
		Mortero	69,5	0,88	0,59/0,72
		Látex	30,0	0,60	0,21/0,70
		L**	4,1 (0,37%)	0,053	0,136/0,058
		M	3,4	0,18	1,76/0,55
		M**	10,42	0,034	0,184/0,126
		MS	9,7	0,037	0,67/0,32
		MS**	21,14	0,051	0,121/0,104
Mínimo	0,061				
Máximo	0,181				

*En masa respecto a la masa de cemento. **Mezclas con fibras. L: látex. M: Metilcelulosa. MS: Metilcelulosa-silica.

4.5.2. Coeficiente piezorresistivo del eje X_1 (hasta 300 N, régimen elástico).

Para determinar el Coeficiente de piezorresistividad (π_{1123}) para el flujo eléctrico a través del eje X_1 debido al campo eléctrico E_1 y al esfuerzo τ_{23} , se utilizaron los mismos datos de la sección anterior hasta un nivel de carga de 300 N (esfuerzo de 3,5 MPa aproximadamente). Esta carga se determinó menor que el 50% de la carga última a cortante, de tal manera que el análisis corresponda al régimen elástico. La Figura 4.27 muestra el nivel de esfuerzo (3,50 MPa) hasta el cual se realizó el ajuste lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la variación fraccional ($\Delta R/R$).

El Coeficiente de piezorresistividad o pendiente de la línea de ajuste, fluctuó entre $4,5603E-4$ y $0,00363 \text{ MPa}^{-1}$. El coeficiente de correlación (R^2) del ajuste lineal fluctuó entre 0,68567 y 0,9923. La Figura 4.30 presenta el mejor ajuste lineal hasta un nivel de esfuerzo de 3,34 MPa, con coeficiente de correlación de 0,9923; el coeficiente de piezorresistividad es $0,00209 \text{ MPa}^{-1}$. Se observó que los ajustes lineales pueden prolongarse hasta 6,00 MPa en algunos casos.

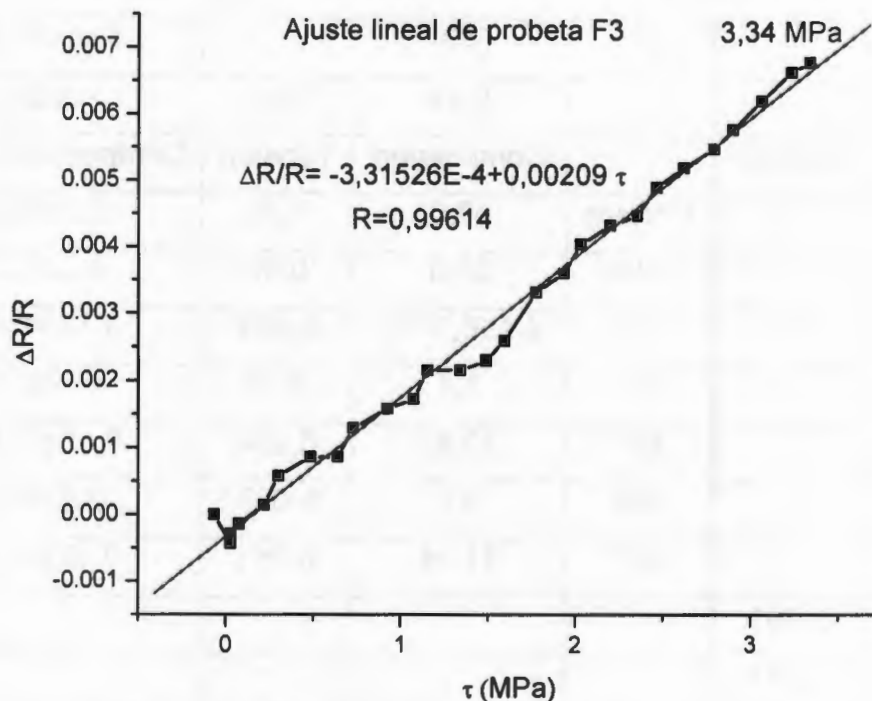


Figura 4.30. Mejor ajuste lineal de una probeta con flujo eléctrico a través del eje X_1 hasta 300 N.

4.5.3. Coeficiente piezorresistivo del Eje X_2 (hasta 300 N, régimen elástico).

Para obtener el Coeficiente piezorresistivo π_{2223} por aplicación del campo eléctrico E_2 y la aplicación del esfuerzo τ_{23} , se realizaron ajustes lineales en las gráficas esfuerzo-variación fraccional. El coeficiente tuvo una variación entre $8,97E-5$ y $0,001678 \text{ MPa}^{-1}$. El coeficiente de correlación varió entre 0,9640 y 0,9946, a excepción de un valor. La carga de 300 N produjo esfuerzos entre 3,41 y 3,99 MPa. La Figura 4.31 muestra el mejor ajuste lineal con R^2 de 0,9946 para un esfuerzo de 3,57 MPa.

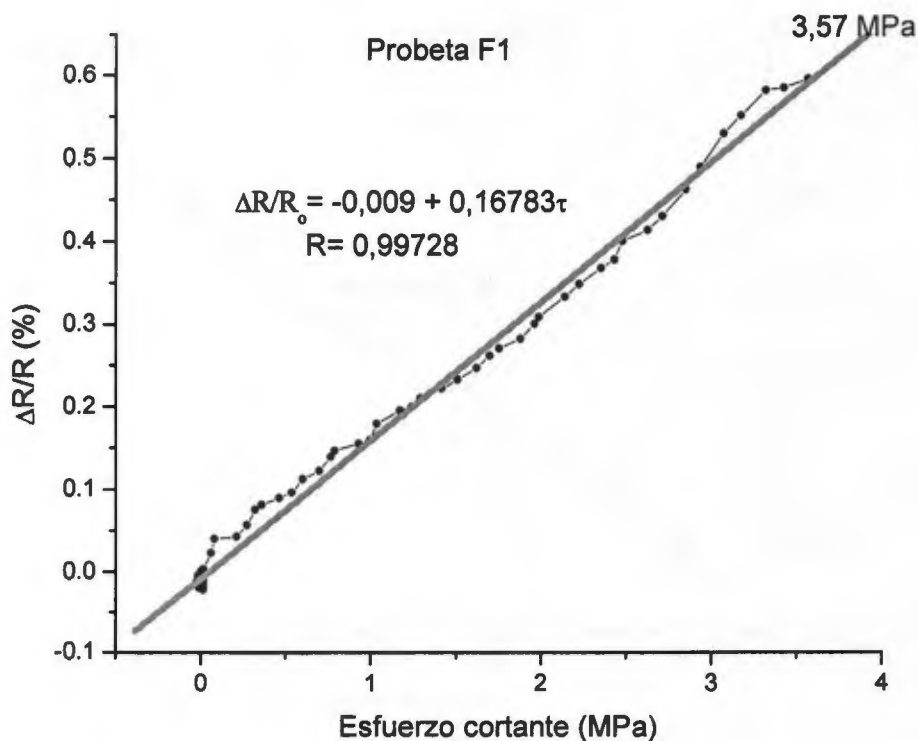


Figura 4.31. Mejor ajuste lineal para flujo eléctrico a través del eje X_2 hasta 300N.

4.5.4. Coeficiente piezorresistivo del eje X_3 (hasta 300 N, régimen elástico).

Para obtener el Coeficiente piezorresistivo π_{3323} por aplicación del campo eléctrico E_3 y aplicación del esfuerzo τ_{23} , se realizaron ajustes lineales en las gráficas esfuerzo-variación fraccional. El coeficiente tuvo una variación entre $5,94843E-4$ y $0,00617 \text{ MPa}^{-1}$. El coeficiente de correlación varió entre 0,9042 y 0,98956. La Figura 4.32 muestra el mejor ajuste lineal.

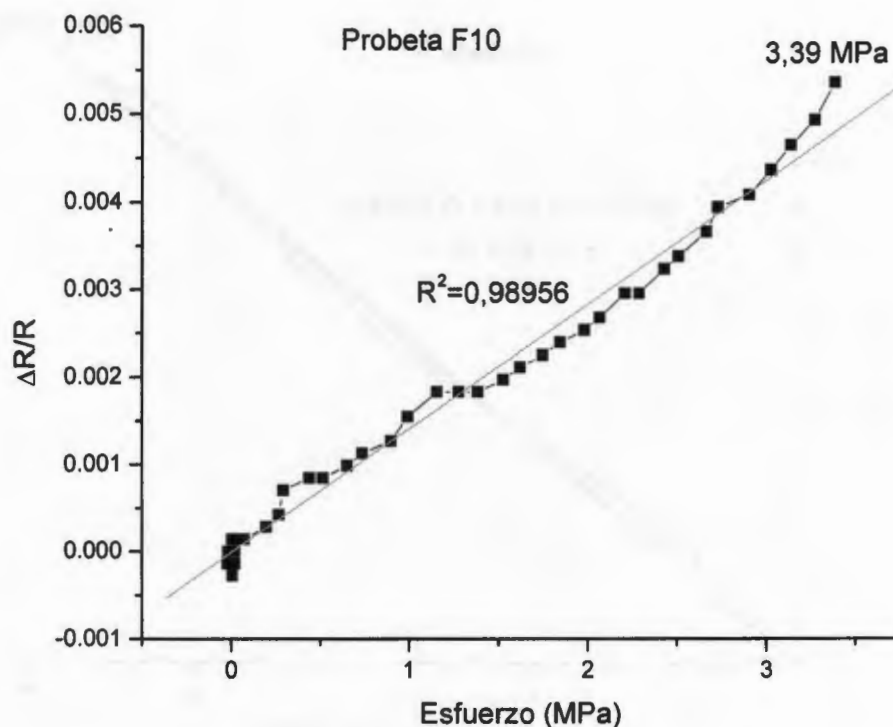


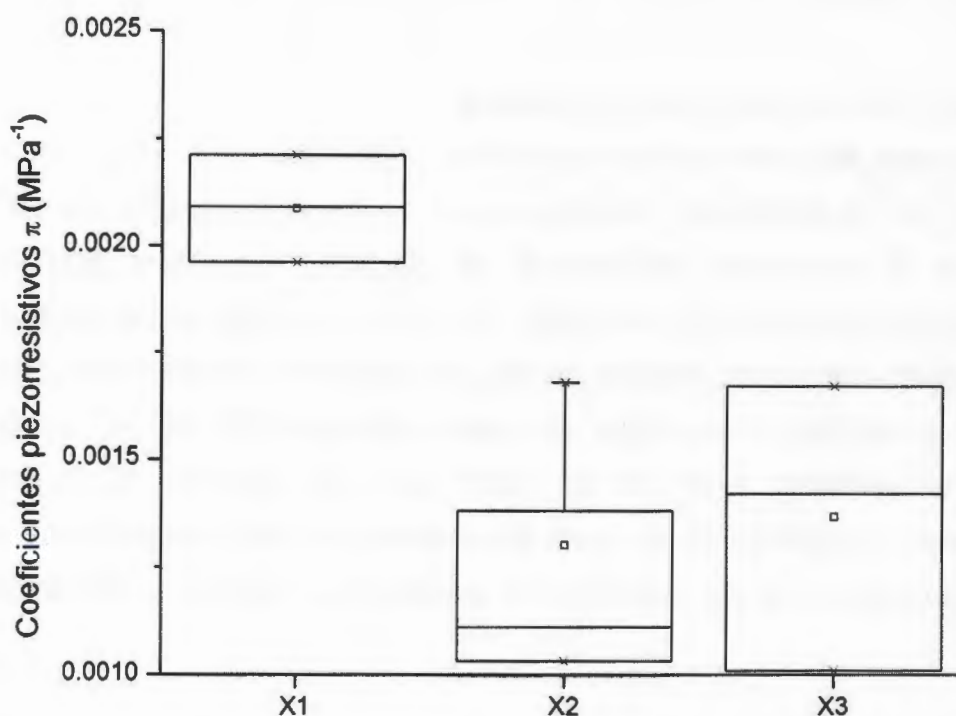
Figura 4.32. Relación entre el esfuerzo cortante y la variación fraccional con flujo en el eje X_3 .

4.5.5. Resumen de Coeficientes piezorresistivos (π_{ijkl}) en los 3 ejes.

La Tabla 4.7 proporciona los promedios de los coeficientes piezorresistivos para flujos eléctricos a través de los ejes X_1 , X_2 y X_3 , hasta un nivel de carga de 300 N (entre 3,5 y 4,0 MPa). La Figura 4.33 presenta la variación de los coeficientes de los tres ejes (se eliminaron los valores anómalos). Considerando que un mayor coeficiente piezorresistivo es sinónimo de sensibilidad, entonces el eje X_1 presentó la máxima sensibilidad. Los ejes X_2 y X_3 presentaron el mismo promedio, al parecer la distancia del recorrido del flujo no afecta al coeficiente, dado que la longitud a través del eje X_2 (76 mm) es mucho mayor que X_3 .

Tabla 4.7. Coeficientes piezorresistivos de los ejes X_1 , X_2 y X_3 .

Flujo	E_1	E_2	E_3
Esfuerzo	τ_{23}	τ_{23}	τ_{23}
Resistividad	ρ_{11}	ρ_{22}	ρ_{33}
	π_{1123}	π_{2223}	π_{3323}
Promedio	0,0021	0,0013	0,0014

Figura 4.33. Coeficientes de piezorresistividad de los ejes X_1 , X_2 y X_3 .

Los Factores de galga (GF por sus siglas en inglés) reportados en 2003 por Wen y Chung [87] (en la Tabla 4.8) son mayores que los obtenidos para cortante; considerando un módulo de cortante de 23,8 GPa y considerando los valores promedios de los coeficientes de piezorresistividad (0,0013 y 0,0021 MPa^{-1}).

Tabla 4.8. Factores de galga.

[87]					Este estudio	
		GF	GF	ρ	π (MPa ⁻¹)	GF
Fibra	%	Tensión	Compresión	Resistividad (ohm·cm)	Cortante	
	1,00				(1,3-2,1)E-3	40±10
A	0,72	4560±640	200±30	16±1		
A	0,36	1290±160	720±100	57±4		
C	0,50	90±10	350±30	(1,5±0,1)E4		

4.5.6. Análisis del fenómeno piezorresistivo.

Posibles causas del aumento de la resistencia eléctrica.

El aumento de la resistencia eléctrica según la literatura puede ser por: 1) aumento de la resistencia eléctrica en la interfase fibra-matriz [63]; 2) la deformación geométrica del material [80], en el caso de material cementicio con fibras de carbón distribuidas aleatoriamente, la deformación puede causar pérdida de puntos de contacto entre fibras, aunque la literatura [63] afirma que no es necesario el contacto entre fibras para que se presente el fenómeno piezorresistivo, basándose en pruebas con porcentajes de fibra por debajo del punto de percolación; 3) y la aparición de grietas (microgrietas y macrogrietas) [64].

Un modelo piezorresistivo desarrollado por Wen y Chung en 2006, para cemento con fibras de carbón propone que el aumento de la resistividad eléctrica se debe al aumento de la “resistividad eléctrica de contacto” en la interfase fibra-matriz, cuando las fibras están sometidas a extracción (pull-out) y están puenteando grietas generadas por la carga mecánica, el modelo es válido tanto para esfuerzos de tensión como de compresión; el modelo se basa en pruebas de extracción de una sola fibra [89].

Efecto de la dirección del flujo eléctrico y el tipo de carga mecánica.

Wen y Chung reportaron aumento de la resistividad eléctrica en probetas de pasta de cemento con látex y fibras de carbón sometidas a tensión uniaxial, el aumento se presentó tanto en la aplicación del flujo eléctrico en la dirección de la carga de tensión mecánica, como en la aplicación del flujo eléctrico perpendicular a la dirección de la carga; el aumento de la resistividad se atribuyó a la generación de defectos, como microgrietas y defectos en la interfase fibra-matriz [85]. Los mismos autores reportaron disminución de la resistividad en probetas de pasta de cemento con látex y fibras de carbón sometidas a carga de compresión, la disminución se observó tanto en la aplicación del flujo eléctrico en la dirección de la carga de compresión, como en la aplicación del flujo perpendicular a la carga de compresión [86]. Reza et al., también reportó disminución de la resistencia eléctrica en probetas de concreto con fibras de carbón sometidas a compresión, la disminución se presentó tanto en la aplicación del flujo en la misma dirección de la carga mecánica, como en la aplicación del flujo perpendicular a la carga de compresión [64]. En este estudio, la resistencia eléctrica aumentó por la aplicación de la carga cortante en cada uno de los tres ejes ortogonales, este resultado es similar al reportado en la literatura [85] para tensión mecánica. Las cargas de cortante y de tensión producen aumentos de la resistividad eléctrica, ya sea que flujo eléctrico se aplique en la misma dirección o transversalmente a la carga mecánica.

Predominio del cambio geométrico o del fenómeno piezoresistivo.

Según Brackett el cambio de la resistencia eléctrica en galgas metálicas está dominado por cambios geométricos; en la fórmula del Factor de galga ($FG=1+2\mu+\pi Y$) los dos primeros términos corresponden a los cambios geométricos y en galgas metálicas la suma es de 1,6; el Factor de Galga fluctúa entre 2 y 4. En galgas de material semiconductor predomina la piezorresistencia del material (π) que corresponde al tercer término de la fórmula (siendo Y el Módulo de elasticidad) y varía entre 40 y 200 [102]. Dorsey afirma que el comportamiento de galgas semiconductoras está basado en la "Teoría Multi-valle

de material semiconductor de un solo cristal". Las galgas semiconductoras tipo N tienen sensibilidad negativa (la resistencia eléctrica disminuye al aplicarle tensión mecánica) y la resistencia aumenta cuando se aplica carga de compresión; las galgas tipo P presentan un comportamiento inverso [103]. Según Dally y Riley [80] la suma $(1+2\mu)$ en galgas metálicas es 1,6 y el tercer término varía entre 0,4 y 2 para la mayoría de las aleaciones; en galgas semiconductoras el tercer término varía entre -125 y 175 dependiendo del tipo y la concentración de la impureza del material semiconductor. El boro es usado como dopante para el semiconductor tipo P (Factor de galga positivo) y el arsénico para producir el tipo N (Factor de galga negativo) [103]. En este estudio, el material con fibra de carbón es semiconductor, los valores reportados para el Factor de galga son mayores que 6 (valor máximo para galgas metálicas) y están cercanos a los valores de galgas de material semiconductor, al parecer el fenómeno piezorresistivo predomina más que los cambios geométricos, su comportamiento es similar a las galgas de material semiconductor tipo P (la resistencia eléctrica aumenta al aumentar la carga de tensión).

Diferencia del Coeficiente de piezorresistividad (π) en los tres ejes.

El promedio del coeficiente piezorresistivo del eje X_1 fue 50% más alto que los promedios de los ejes X_2 y X_3 , los cuales resultaron similares. El eje X_1 es más sensible, además presentó el mínimo rango, o sea, un comportamiento más homogéneo. Además el eje X_1 presentó la más alta resistividad eléctrica (mínima conductividad). En galgas de material semiconductor se presentan casos en los cuales, una alta resistividad eléctrica produce una alta sensibilidad.

Incremento de la resistencia eléctrica (ΔR) en los tres ejes.

El incremento de la resistencia eléctrica (ΔR) al nivel de carga de 300 N fue máximo en el eje X_2 (longitudinal), al parecer porque el recorrido eléctrico es más largo. Suponiendo que el flujo eléctrico se debe a los puntos de contacto entre las fibras (porcentaje de fibras cercano al punto de percolación), es razonable aceptar

que, a mayor longitud mayor es la probabilidad de pérdida de contacto entre fibras, y en consecuencia mayor incremento de la resistencia eléctrica.

Efecto de la carga cortante en el flujo eléctrico.

Las distintas distribuciones de la carga de cortante en la probeta pueden también determinar la mayor diferencia ΔR observada en el eje X_2 . La distribución del cortante a lo largo de la probeta losipescu o de doble muesca en el centro puede observarse en la Figura 4.34. El valor del cortante es menor en los extremos y máximo en el centro con valor P . El máximo cortante P afecta principalmente a los flujos eléctricos aplicados en la parte central: X_1 (espesor) y X_3 (muescas). En cambio el flujo eléctrico a través del eje X_2 está afectado por tres cambios en el nivel del cortante: de los extremos y el cortante central. Lo que es común para los tres ejes es la distribución del esfuerzo cortante en la parte central de la probeta, que parte de un valor en el inicio de la muesca y por la disminución de la sección transversal en la muesca alcanza un valor máximo (P/wt) como se muestra en la Figura 4.34. Es aceptable suponer, que un cortante constante genera un flujo eléctrico constante, pero la variación del cortante puede dar como resultado un flujo no uniforme. Lo notable de este párrafo es que el flujo a través del eje X_2 está sometido a diferentes valores de cortante, que pudieron arrojar un mayor incremento de la resistencia eléctrica ΔR .

Diagrama de fuerzas cortantes y momentos para el método de losipescu

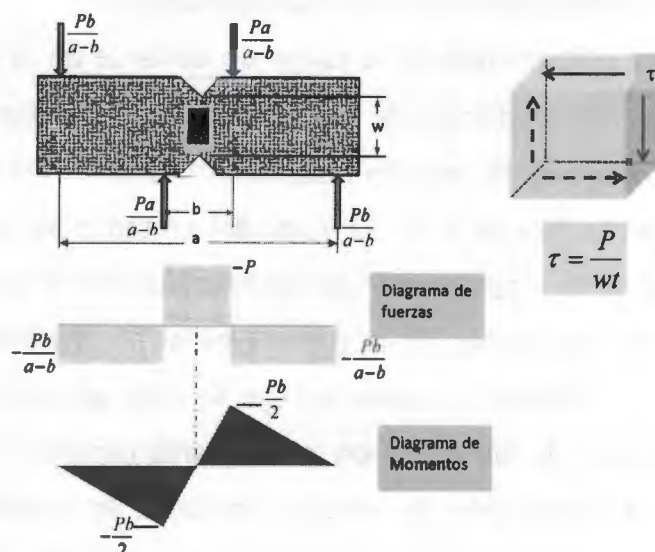


Figura 4.34. Diagramas de fuerzas cortantes y momentos de flexión del método losipescu.

Esfuerzos de cortante en la sección transversal.

Cada sección transversal tiene un esfuerzo cortante promedio; pero una propuesta de distribución considera que el esfuerzo cortante es cero en los extremos de la sección transversal y que tiene máximo valor en el centro ($3/2$ del esfuerzo promedio). Esta propuesta de concentración de esfuerzos en la parte central, coincide con lo observado en un estudio óptico sobre la distribución de las deformaciones angulares generadas por cortante en una probeta losipescu [100] en el área de las muescas; el Material compuesto estudiado fue elaborado con fibra de carbón/resina. Las Figuras 4.35 y 4.36 presentan resultados del estudio, el color rojo indica altas deformaciones angulares. La Figura 4.35 presenta altas deformaciones (no deseadas) en los vértices de las muescas y en puntos de aplicación de carga, en este caso las fibras están paralelas al eje longitudinal. La Figura 4.36 muestra altas deformaciones en el centro, pero con una distribución más uniforme (deseado en las pruebas), las fibras están perpendiculares al eje longitudinal. Aplicado a nuestro estudio, las probetas “sin fibras” podrían haber

presentado una distribución de deformaciones similar a la Figura 4.35 ya que la forma de fractura obedece a esta distribución, mientras que las probetas “con fibras de carbón” que presentaron falla en la parte central coinciden con la distribución de las deformaciones de la Figura 4.36, en la cual se observa que las deformaciones aumentan cerca del centro. El efecto de la distribución de esfuerzos y deformaciones angulares en el flujo eléctrico, conduce a considerar que el flujo no es uniforme en el centro de la probeta, lo cual arrojaría diferentes incrementos de resistencia eléctrica.

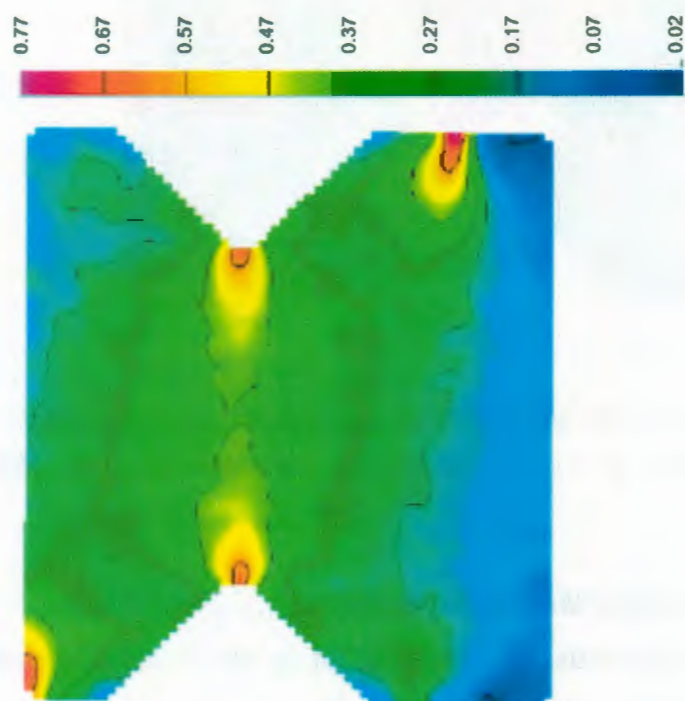


Figura 4.35. Distribución de deformaciones por cortante ϵ_{xy} en probetas losipescu obtenida mediante técnica óptica, en material compuesto con refuerzo horizontal, fibra de carbón/resina polimérica [100].

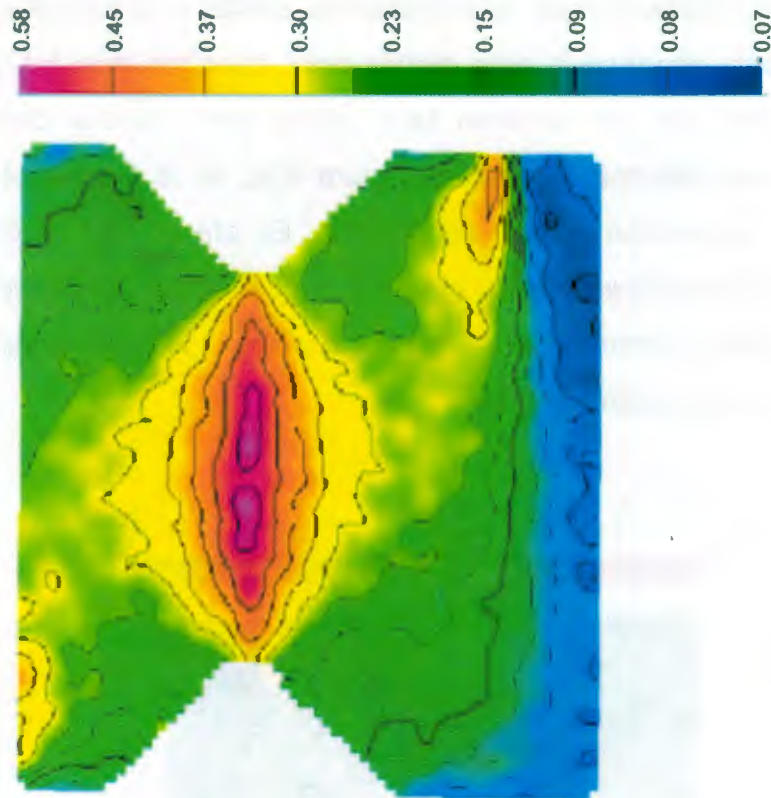


Figura 4.36. Distribución de deformaciones por cortante ε_{xy} en probetas losipescu obtenida mediante técnica óptica, en material compuesto con refuerzo vertical, fibra de carbón/resina polimérica [100].

Posible efecto nulo del Momento flexionante.

Además de los esfuerzos de cortante, la probeta está sometida a momento flexionante como puede observarse en la Figura 4.34. El momento es negativo en la parte izquierda y positivo en la parte derecha. El momento negativo genera esfuerzos de tensión en la parte superior de la probeta y de compresión en la parte inferior. El momento positivo genera un efecto inverso en la parte derecha, genera esfuerzos de tensión en la parte inferior y de compresión en la parte superior. El valor absoluto del máximo momento negativo y el positivo son iguales. En los ejes X_1 y X_3 el momento flexionante varía desde un máximo a cero en el centro de la probeta, mientras que en el eje X_2 el momento varía de cero en el extremo de la probeta, a un máximo valor y disminuir nuevamente a cero en el centro de la probeta, tanto para el momento negativo como para el positivo.

Asumiendo que los esfuerzos de tensión aumentan la resistencia eléctrica [85] y los esfuerzos de compresión la disminuyen [86], los efectos en la resistencia eléctrica por el momento flexionante se nulifican en los tres ejes, quedando únicamente el esfuerzo cortante como el factor principal que causa el aumento de la resistencia eléctrica. Observando que el flujo eléctrico en los ejes X_1 y X_3 son perpendiculares a los esfuerzos de tensión y compresión generados por el momento, pero está reportado que aún así los esfuerzos de tensión generan un aumento de la resistividad [85] y los de compresión una disminución [86]. El resultado de este párrafo ayuda a entender porque el eje X_2 presentó un mayor incremento de la resistencia eléctrica ΔR .

4.6. Resistencia a compresión (f_c) de las mezclas.

La Figura 4.37 compara las resistencias a compresión (f_c) de las mezclas de pasta de cemento (P), pasta de cemento con látex (L); y pasta de cemento con látex y fibras de carbón (F); se graficaron los límites inferior y superior (30 y 50 MPa) del cemento Pórtland utilizado de acuerdo a la norma NMX-C-414. La mezcla F se ensayó con probetas de dos tipos de sección: cuadrada (F_c) y rectangular (F_r). La mezcla P tuvo un promedio de 50 MPa (máximo de todas las pruebas); además tuvo el rango más alto. La mezcla de látex (L) tuvo el promedio más bajo. Los promedios de la mezcla F (F_c y F_r) presentaron un valor intermedio entre las mezclas P y L. Las probetas F_r tuvieron el mínimo rango de todas las pruebas. Chung reportó menor resistencia de probetas de cemento con fibras de carbón que la resistencia de probetas de pasta de cemento [43]. La pasta de cemento (P) tuvo un promedio 10% más grande que la mezcla F; y 60% más alto que la mezcla de látex L. La relación compresión/cortante fue 25 en la mezcla P; y 4,4 en la mezcla F. El añadido de látex a la pasta de cemento (con la cantidad usada en este estudio) disminuye la resistencia a compresión; una investigación reportó disminución del 50% de la resistencia a la compresión por el añadido de látex [18]. El añadido de fibras de carbón a la mezcla de cemento-látex aumenta la resistencia a la compresión f_{cu} .

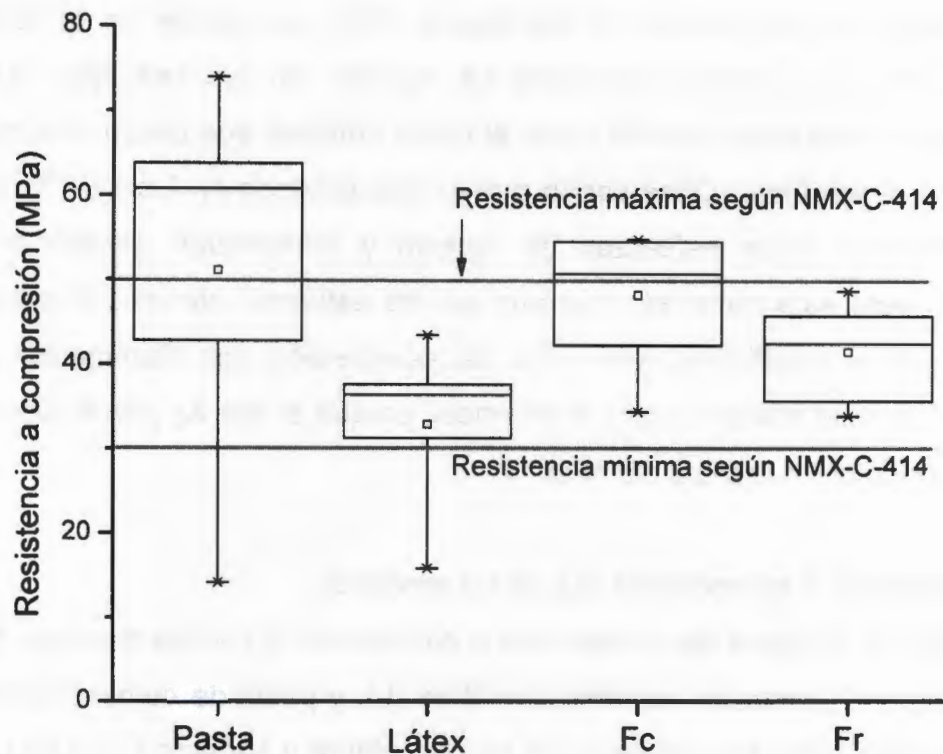


Figura 4.37. Resistencia a compresión de las mezclas P, L y F.

Relación compresión-cortante de probetas con fibra de carbón.

La Figura 4.38 presenta un diagrama de dispersión de los esfuerzos de cortante τ y de la resistencia a compresión f_c . Se observa que las probetas de sección cuadrada presentan una relación directa, a mayor cortante mayor compresión; por otra parte no se observa una correlación entre el esfuerzo de cortante y la resistencia a compresión de probetas de sección rectangular. La relación entre el promedio de la resistencia a compresión de probetas de sección cuadrada y el promedio de las probetas de sección rectangular es de 1,1. La mayoría de las resistencias a compresión de las probetas de sección cuadrada, es mayor que las resistencias de sección rectangular.

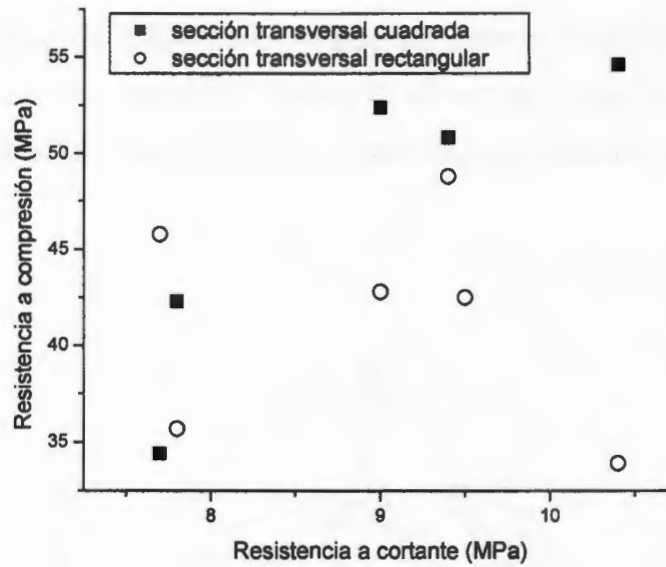


Figura 4.38. Resistencia al esfuerzo cortante τ y compresión f_c .

Curvas esfuerzo-deformación.

La Figura 4.39 presenta curvas esfuerzo-deformación de probetas de sección cuadrada (F_c). El Módulo de elasticidad (E) es similar en todas la pruebas. Se observa un tramo lineal en la zona elástica.

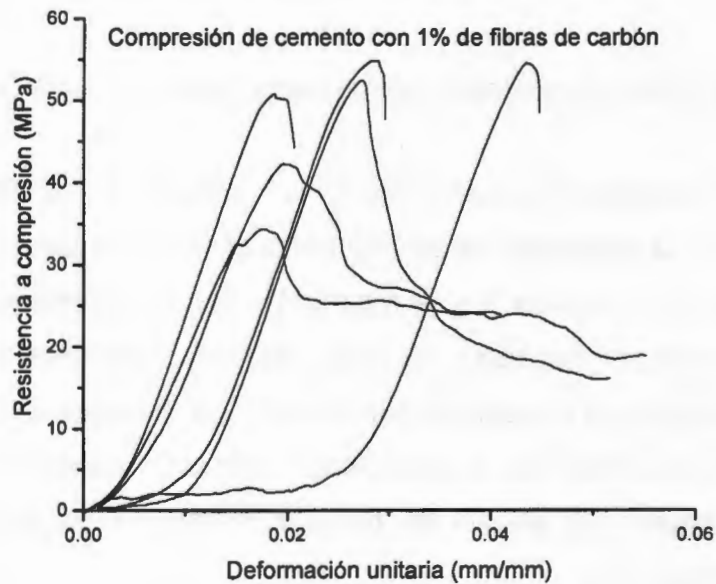


Figura 4.39. Curvas esfuerzo-deformación mezcla F_c (probetas sección cuadrada)

La Figura 4.40 presenta curvas esfuerzo-deformación de probetas de sección rectangular (Fr). Se observan curvas “rugosas” mientras que las curvas anteriores fueron lisas. Todas las curvas presentan zonas elásticas y plásticas.

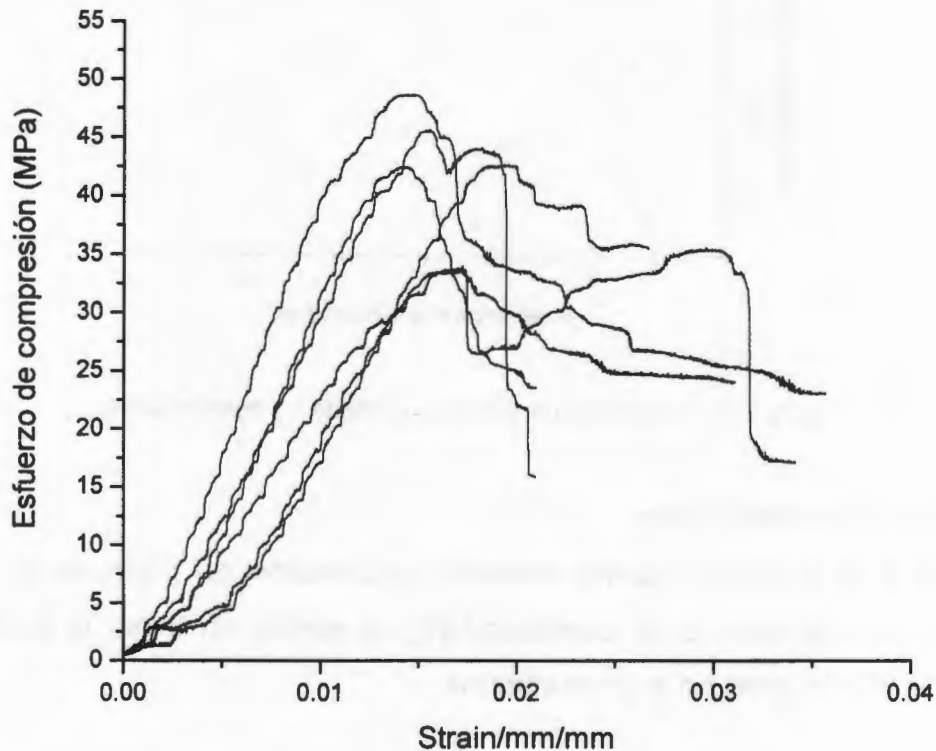


Figura 4.40. Curvas esfuerzo-deformación mezcla F (probetas sección rectangular)

La Figura 4.41 muestra los promedios y la variación de la tenacidad de las mezclas P, L y F. La tenacidad se calculó hasta el esfuerzo último. Los promedios máximos fueron de la mezcla P y la mezcla Fc (sección cuadrada). El promedio mínimo fue de la mezcla de látex L. El rango máximo correspondió a la mezcla P y el mínimo a la mezcla Fc (sección cuadrada). Las mezclas L y Fr presentaron rangos similares. La tenacidad a compresión disminuye cuando se añade látex a la pasta de cemento. La adición de fibras a la mezcla de látex L incrementa nuevamente la tenacidad.

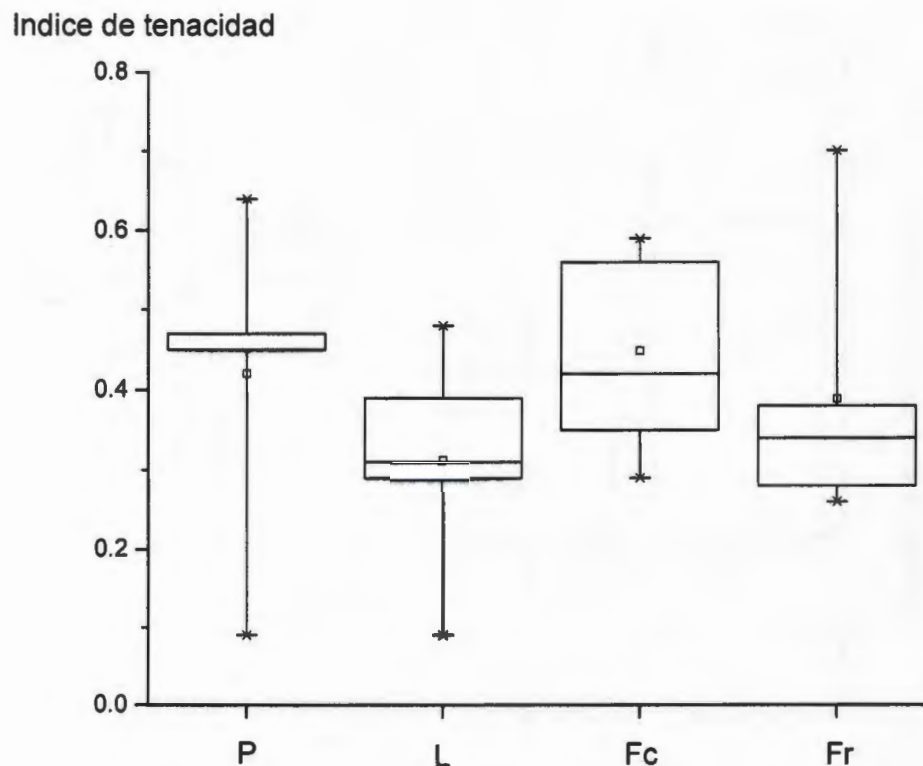


Figura 4.41. Tenacidad (hasta esfuerzo último) para P, L y F.

Módulo de elasticidad (E).

La Figura 4.42 compara los promedios y las variaciones de los módulos de elasticidad de las mezclas. Las mezclas P y F presentan promedios similares (3,5 GPa). La mezcla P presenta el máximo rango (4 GPa) y Fc el mínimo (0,9 GPa). La mezcla L tuvo el promedio mínimo (1,75 GPa). La adición de látex a la pasta de cemento (con la proporción usada en este estudio) disminuye el módulo de elasticidad por sus características elastoméricas. La adición de fibras a la mezcla de látex L incrementa nuevamente el módulo de elasticidad.

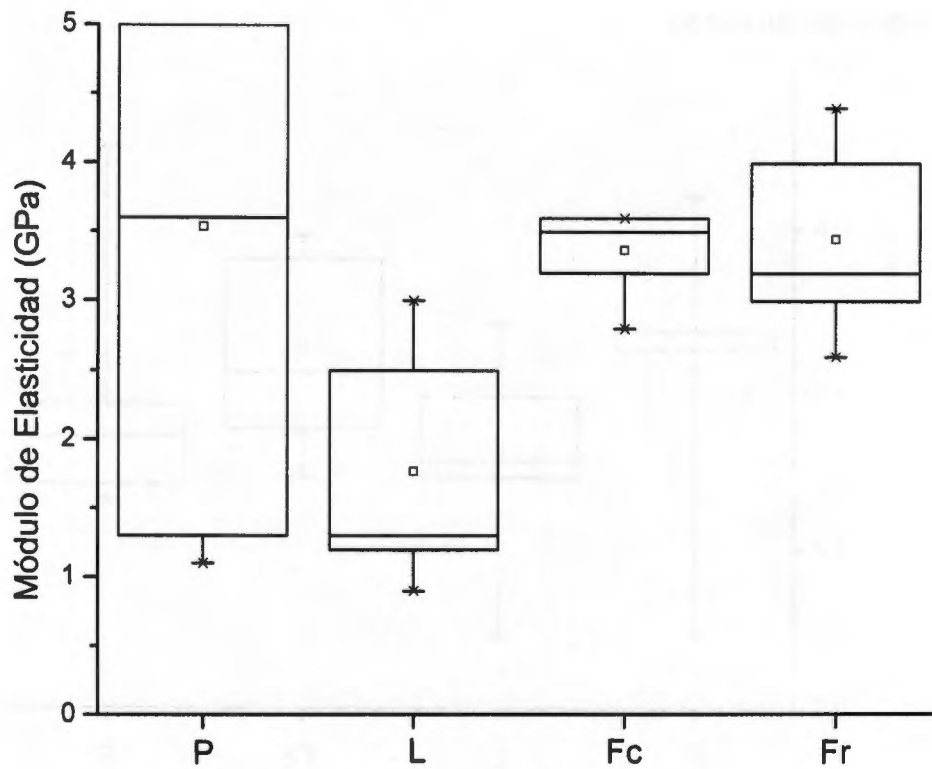


Figura 4.42. Módulo de elasticidad de las mezclas.

CONCLUSIONES

El Material compuesto con matriz de cemento Portland de este estudio, por el añadido del 1% de fibras de carbón (en masa respecto al cemento) tuvo los siguientes resultados: 1) aumentó cuatro veces la resistencia a cortante; 2) cambió el comportamiento frágil del cemento a un comportamiento más dúctil; 3) aumentó la tenacidad; 4) cambió el tipo de fractura, de una grieta diagonal a una grieta vertical central en las muescas; 5) aumentó el triple el Módulo de cortante de la pasta de cemento; y 6) presentó la "primera grieta" característica de vigas de concreto fibro-reforzado sometidas a flexión. En este estudio, la resistencia a cortante representó el 4% de la resistencia a compresión de la mezcla de cemento debido a la baja resistencia al cortante, pero la adición de fibras de carbón en la mezcla ocasionó que el porcentaje aumente a 23% debido al aumento de la resistencia a cortante y a la disminución de la resistencia a compresión.

El añadido de látex (20% respecto a la masa de cemento) en la pasta de cemento no tuvo un efecto significativo en la resistencia a cortante, pero si disminuyó el promedio de la resistencia a compresión. El añadido de las fibras de carbón en la mezcla cemento-látex aumentó la resistencia a compresión.

El método ASTM D5379 para Materiales compuestos es una opción para la obtención de la resistencia a cortante de materiales cementicios reforzados con fibras, dado que su modo de falla ocurre en el plano que une a las dos muescas de la probeta. Asimismo con este método fue posible obtener el Módulo de cortante usando galgas extensométricas en un arreglo de 45°.

En el Material compuesto con matriz de cemento-látex, el añadido del 1% (en masa) de fibras de carbón, porcentaje cercano al punto de percolación según la literatura, crea rutas de percolación eléctrica, como consecuencia aumentó siete órdenes la conductividad eléctrica, convirtiendo al material compuesto cementicio en un material semiconductor con una conductividad cercana al germanio. Por otra

parte, es razonable asumir que una mayor homogeneidad del material produce una mayor conductividad eléctrica.

El comportamiento inteligente del material compuesto con fibras de carbón o comportamiento sensor, que es una manifestación del fenómeno piezorresistivo, reportado en la literatura bajo cargas de tensión, compresión y flexión, se observó en este estudio bajo fuerzas de cortante. La aplicación de las fuerzas de cortante produjo aumento de la resistencia eléctrica en cada uno de los tres ejes ortogonales, similar a lo reportado en la literatura para probetas a tensión y para galgas de material semiconductor tipo P. En la zona elástica hasta un 40% de la resistencia última se observó una correlación lineal entre el esfuerzo cortante y el cambio fraccional de la resistencia eléctrica ($\Delta R/R$). En la zona plástica hasta el esfuerzo último se estableció una relación directa no-lineal que se ajusta adecuadamente a un polinomio de grado nueve; después del esfuerzo último, el esfuerzo cortante disminuyó y la resistencia eléctrica tuvo grandes incrementos por la evolución de la grieta.

Los Coeficientes de piezorresistividad (π) fueron diferentes en los tres ejes. El Coeficiente del eje X_1 (espesor) fue 50% más alto o sensible que los ejes X_2 y X_3 . El eje X_1 tuvo la máxima área de tintura de plata y la mínima conductividad eléctrica. Los coeficientes de los ejes X_2 y X_3 presentaron valores similares. Los incrementos de la resistencia eléctrica (ΔR) de los tres ejes fueron diferentes, el eje X_2 tuvo el mayor incremento (1,5 ohm) hasta 300 N en la zona elástica; un tercio de este incremento correspondió a los otros ejes. Los Factores de galga resultaron menores que los reportados en la literatura para probetas sometidas a fuerzas de tensión y compresión.

La probeta losipescu se encuentra sometida a diferentes valores de cortante, el máximo se presenta en la parte central, como consecuencia los flujos eléctricos a través de los diferentes ejes están sometidos a diferentes esfuerzos de cortante. Estos cambios afectan principalmente al flujo a través del eje X_2 , mientras que los

ejes X_1 y X_3 están sometidos principalmente al cortante máximo. Como consecuencia el flujo eléctrico es variable en los tres ejes y afecta los resultados de los parámetros obtenidos.

El momento flexionante que actúa en la probeta losipescu, posiblemente presenta un efecto anulatorio, debido a que la parte izquierda tiene signo negativo y la derecha positivo, el momento genera tanto esfuerzos de tensión como de compresión en las secciones transversales, asumiendo que la tensión disminuye el flujo eléctrico, mientras que la compresión lo aumenta, y los momentos tienen signo contrario, el efecto del momento respecto al flujo eléctrico posiblemente es anulado, por tanto, la probeta está sometida sólo a fuerzas de cortante. Esto ayuda a comprender porque el flujo a través del eje X_2 tuvo el mayor incremento ΔR , por estar sometido a variaciones de cortante.

REFERENCIAS

- [1] Akihama, S., Suenaga, T., Nakagawa, H. "Carbon Fiber Reinforced Concrete", Concrete International, January 1998, pp 40-47.
- [2] Chung Deborah D.L. Multifunctional Cement-Based Materials, Marcel Dekker, 2003.
- [3] Chung D.D.L. Patent Number US5817944-A, Strain/Strain sensor for structures made from composite materials – using embedded carbon fibres and the concept of reversible crack opening causing changes in electrical resistivity of the structure, Oct 6, 1998.
- [4] Neville, Adam M. Tecnología del concreto, IMCYC, Tomo I, 1977.
- [5] Skalny J., Materials Science of Concrete I, The American Ceramic Society, 1989.
- [6] Perumalsamy N.B., Shah P.S. Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw Hill, 1992.
- [7] Stutzman Paul E., "Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography" en Materials Science of Concrete Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete, Proceedings, Skalny J., Gebauer J., Odler I., editores, The American Ceramic Society, 2000.
- [8] Abyaneh M. Y., Keedwell M. J., Leppard C. Advances in Cement Research, 13, No.3, Julio 2001, 131-137.
- [9] Metha P. Kumar, Concrete: Structure, properties, and materials, Prentice-Hall, 1986.
- [10] Malier Yves, High Performance Concrete: From material to structure, E & FN Spon, 1992.
- [11] Wang Chu-Kia, Salmon Charles G., Reinforced Concrete Design, Wiley, 2002.
- [12] ASTM 169C Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, Eds. Klieger Paul y Lamond Joseph F., 1994.
- [13] ACI 548.1R Guide for the Use of Polymers in Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 5 1992.
- [14] IMCYC, Aditivos para concreto, Noriega-Limusa, 1983.
- [15] Dikeou J.T. Polymers in Concrete: New Construction Achievements on The Horizon, Second International Congress on Polymers in Concrete, Fowler D.W. and Paul D.R. Eds., ACI and Federal Highway Administration (FHA), October 25-27, Texas, 1978.
- [16] K.K. Yun, D.H. Kim, K.J. Kim, Can. J. Civ. Eng. 34, 895-901, 2007.
- [17] Wang R., Wang P.M., Li X., "Physical and mechanical properties of styrene-butadiene modified cement mortars", Cement and Concrete Research 35, 2005, pp 900-906.

- [18] Odler I., Liang N., "Properties and development of the microstructure in cement pastes modified by a styrene-butadiene co-polymer", *Advances in Cement Research*, 15, No.1, January 2003, 1-8.
- [19] Colak A., *Cement and Concrete Research* 35, 2005, 1510-1521.
- [20] Kuhlmann Lou A., O'Brien Michael, "Polymer-Modified Concrete and Mortar" in *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, Eds. Klieger Paul y Lamond Joseph F., ASTM 169C, 1994.
- [21] Cady Philip D., Weyers Richard E., Wilson David T., "Durability and compatibility of Overlays and Bridge Decks Substrate Treatments", *Concrete Internacional*, June 1984.
- [22] Sawada Eijil, *Concrete Internacional*, Vol.12, No.3, marzo, 1990.
- [23] Pech Poot J.R., *Modificación del modo de falla en un Material compuesto polímero-cemento*, Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Mérida, 1995.
- [24] ACI 544.1R-96 *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, Manual of Concrete Practice, Part 5 1992.
- [25] Bentur A., "Fiber-reinforced cementitious materials", in *Materials Science of Concrete I*, Ed. J. Skalny, The American Ceramic Society, 1989.
- [26] Johnston Colin D. "Fiber Reinforced Concrete" en "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials" Eds. Klieger Paul y Lamond Joseph F., ASTM STP 169C pp 547-561, 1994.
- [27] Ouyang C., Shah S.P., *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, pp 1201-1215, 1992.
- [28] Illston J.M. Editor, *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*, E&FN SPON, 1994.
- [29] Chen Pu-Woei, Chung D.D.L., *ACI Materials Journal*, marzo-abril, 1996.
- [30] Banthia N., Moncef A., Chokri K., Sheng J., *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 21, 1994.
- [31] Bayasi Z., McIntyre M. "Application of Fibrillated Polypropilene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete", *ACI Materials Journals*, July-August, 2002.
- [32] Li V.C., Wu C., Wang S., Ogawa A., Saito T., *ACI Materials Journal*, September-October, 2002.
- [33] Xu Y., Chung D.D.L., *ACI Materials Journal*, May-June, 2000.
- [34] ASTM C 1018-97 "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", 2002.
- [35] Cross W.M., Sabnis K. H., Kjerengtroen L., Kellar J. J., *ACI Materials Journal*, March-April, 2000.
- [36] Naaman A.E., Najm H., *ACI Materials Journal*, March-April, 1991.

- [37] Fu X., Chung D.D.L., "Improving the Bond Strength of Concrete to Reinforcement by Adding Methylcellulose to Concrete", ACI Materials Journal, September-October, 1998.
- [39] RILEM International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications, Proceedings PRO 49, Fischer G. and V.C. Li V.C., France, 2006.
- [40] Kuder K.G., Mu E.B., Shah S.P., ASCE J. of Materials in C.E., May-June, 2006.
- [41] Delmonte John, Technology of carbon and graphite fibers composites, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [42] MIL 17 The Composite Materials Handbook, Volume 5, Ceramic Matrix Composites, Part A: Introduction and Guidelines, ASTM, 2002.
- [43] Chung Deborah D.L. Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, 1994.
- [44] Chen Pu-Woei, Fu Xuli, Chung D.D.L. "Improving the Bonding between Old and New Concrete by Adding Carbon fibers to the New Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.3, 1995, pp 491-496.
- [45] Issa M. A., Alazán M.A., Ramos J. C., Concrete Internacional, marzo 2007.
- [46] Barragán, B., Gettu R., Agulló L., Zerbino R. "Shear failure of Steel Fiber-Reinforced Concrete Based on Push-Off Tests", ACI Materials Journal, July-August 2006, pp 251-257.
- [47] Van Zijl G.P.A.G. "Improved mechanical performance: Shear behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC)", Cement and Concrete Research 37, 2007, pp 1241-1247.
- [48] Majdzadeh F., Soleimani S.M., Banthia N., Can. J. of Civ. Eng. 33, 726-734, 2006.
- [49] Kazemi M.T., Broujerdian V., Can. J. of Civ.Eng. 33, 161-168, 2006.
- [50] Elliot K.S., Peaston C.H., Paine K.A., Materials and Structures, Vol. 35, November, 2002, pp 519-527.
- [51] Revéis K.S., Fente J., Frabizzio M., J. of Materials in C.E., November-December, 2001
- [52] Cho S.H., Kim Y.I., ACI Structural Journal, November-December, 2003.
- [53] K.H. Tan, P. Paramasivam, K. Murugappan, ACI Structural Journal, November-December, 1995.
- [54] Shabaan A.M., Gesund H., ACI Structural Journal, July-August, 1994.
- [55] Narayanan R., Darwish I.Y.S., ACI Structural Journal, marzo-abril, 1988.
- [56] Mirsayah A.A., Banthia N., ACI Materials Journal, September-October, 2002.
- [57] RILEM TC 162-TDF

- [58] CSA A23.3 Provisiones de cortante para concreto reforzado. E. C. Bentz, M.P. Collins, Canadian Standards Association, 2004.
- [59] ASTM D 5379/D 5379M-98 "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method" Volume 15.03. pp 229-241, 2003.
- [60] Borzani-Manham L.G., Pardini L.C., Levy-Neto F., Assessment of Tensile Strength of Graphites by the Iosipescu Coupon Test, Materials Research, Vol. 10, No.3, 233-239, 2007.
- [61] Wallace Gordon, Spinks Geoffrey M., Teasdale P. R., Conductive Electroactive Polymers, Intelligent Materials Systems, Technomic Publishing Company, 1997.
- [62] Addington D.M., Scoedek D.L., Smart Materials and Technologies, Elsevier, 2005.
- [63] Chen Pu-Woei, Chung D.D.L., "Carbon Fiber Reinforced Concrete as an Intrinsically Smart Concrete for Damage Assessment during Static and Dynamic Loading", ACI Materials Journal, July-August, pp 341-350, 1996.
- [64] Reza F., Batson G.B., Yamamuro J.A., J.S. Lee, "Resistance Changes during Compression of Carbon Fiber Composites", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, September-October, 2003.
- [65] Janocha H. "Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design and Applications" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1999.
- [66] Anderson T.L., Fracture Mechanics, CRC Press, pp 53, 1995.
- [67] Chandrupatla Tirupathi R., Belegundu Ashok D., Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería, Prentice Hall Hispanoamericana, segunda edición, 1999.
- [68] Nobel Prize in Chemistry: Conductive Polymers, 2000.
- [69] Bentz D.P., Garboczi E.J., Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp 325-344, 1991.
- [70] Stauffer D., Encyclopedia of Nonlinear Science, Ed. Alwyn Scott, Taylor & Francis, pp 698-700, 2005.
- [71] Neelakanta Perambur S., Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions and Their Applications, CRC, 1995.
- [72] Halabe U., Sotodehnia A., Maser K.R., Kausel E. A., ACI Material Journal, noviembre-diciembre, 1993.
- [73] Princigallo A., Breugel K.V., Levita G., Cement and Concrete Research 33 No.7, pp 1755-1763, 2003.
- [74] Naik T.R., Graus R. N., Ramme B.W., Chun Y.M., Kumar R., J. of Materials in C.E. ASCE, November-December, 2006.

- [75] Banthia N., Djeridane S., Pigeon M., "Electrical Resistivity of Carbon Fiber and Steel Micro-Fiber Reinforced Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, pp 804-814, 1992.
- [76] Wen S., Chung D.D.L., "Effect of stress on the electrical polarization in cement". *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp 291-295, 2001.
- [77] Sun M., Li Z., Mao Q., Shen D., *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.12, pp 1707-1712, 1998.
- [78] Wen S., Chung D.D.L., *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp 141-147, 2001.
- [79] Capurso Joseph S., Schulze Walter A. "Piezoresistivity in PTCR Barium Titanate Ceramics: II, Mathematical Modeling", *J. Am. Ceram. Soc*, 81 (2), pp 347-56, 1998.
- [80] Dally J.W., Riley W.F., *Experimental Stress Analysis*, McGraw Hill, 1987.
- [81] Fu X., Ma E., Chung D.D.L., Anderson W.A., "Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement", *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.6, pp 845-852, 1997.
- [82] Fu X., Chung D.D.L., "Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No.9, pp 1313-1318, 1997.
- [83] Fu X., Lu W., Chung D.D.L., "Improving the strain-sensing ability of carbon fiber-reinforced cement by ozone treatment of fibers", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.2, pp 183-187, 1998..
- [84] Shi Z.Q., Chung D.D.L., "Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp 435-439, 1999.
- [85] Wen S., Chung D.D.L., "Uniaxial tension in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30., pp 1289-1294, 2000.
- [86] Wen S., Chung D.D.L., "Uniaxial compression in carbon fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31., pp 297-301, 2001.
- [87] Wen S., Chung D.D.L., "A comparative study of steel- and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors", *Advances in Cement Research*, Vol. 15, No.3, pp 119-128, 2003.
- [88] Wen S., Chung D.D.L., "Strain-Sensing Characteristics of Carbon Fiber-Reinforcement Cement", *ACI Materials Journal*, July-August, 2005.
- [89] Wen S., Chung D.D.L., "Model of piezoresistivity in carbon fiber cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp 1879-1885, 2006.
- [90] Wen S., Chung D.D.L., "Piezoresistivity-Based Strain Sensing in Carbon Fiber-Reinforced Cement", *ACI Materials Journal*, March-April, 2007.

- [91] Wen S., Chung D.D.L., "Effect of Moisture on Piezoresistivity of Carbon Fiber-Reinforced Cement Paste", *ACI Materials Journal*, May-June, 2008.
- [92] SikaLátex-N, Aditivo adherente y mejorador de resistencia para mortero, Hoja técnica SIKA, Edición 1, No. DC-HT-PF112100-03-05, 2005.
- [93] Hexel, IM7, Carbon Fiber, USA.
- [94] ASTM C 395-99 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- [95] ASTM C 109/C-01 Standard Test Method for Compression Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens).
- [96] Wong R.C.K., Ma S.K.Y., Wong R.H.C., Chau K.T. "Shear strength components of concrete under direct shearing", *Cement and Concrete Research* 37, pp 1248-1256, 2007.
- [97] Mottram J.T. "Shear Modulus of Standard Pultruded Fiber Reinforced Plastic Material", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, March-April 2004, pp 141-147.
- [98] Hansson I. L. H., Hansson C. M., "Electrical Measurements of Portland Cement Based Materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp 675-683, 1983.
- [99] Novelo-Carrillo F.A. "Mejora del comportamiento mecánico y eléctrico de material cementicio con fibras de carbón para su funcionamiento como material inteligente", Tesis de la Maestría en Ingeniería-construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 2009.
- [100] Melin L.G., Neumeister J.M., Petterson K.B., Johansson H.L., and Asp L.E., Evaluation of four Composite Shear Test Methods by Digital Speckle Photography and Fractography Analysis, *J. Composite Technology and Research*, Vol. 22, pp 161-172, 2000.
- [101] Amin., Akdogan E.K. Piezoresistivity: Theory and Applications, A Tutorial Presentation for the IEEE-Ultrasonic, Ferroelectrics & Frequency Control Society (UFFC), www.ieee-uffc.org, 2005.
- [102] Brackett A.H., Basic Semiconductor Strain Gage Transducers, in "Strain Gage User's Handbook", Hannah R. L., Reed S.E. Editors, Elsevier Science Publishers and Society For Experimental Mechanics, Inc., 1992, pp 449-465.
- [103] Dorsey J., Semiconductor Strain Gages in "Strain Gage User's Handbook", Hannah R. L., Reed S.E. Editors, Elsevier Science Publishers and Society For Experimental Mechanics, Inc., 1992, pp 365-418.

