

Universidad Nacional De San Cristóbal De Huamanga

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

**"Comportamiento del concreto ante cargas de compresión con inclusión del
dispositivo SRD, compuesto de capas de caucho reciclados y láminas de
acero"**

PRESENTADO POR:

TOVAR RODRIGUEZ, JORGE FRANK

ASESOR:

Msc. Ing. Javier Francisco Taípe Carbajál

Ayacucho - Perú

2022

RESUMEN

En este estudio se ha investigado el efecto que tiene el SRD en el comportamiento del concreto mediante un ensayo experimental y numérico sobre probetas de concreto estándar (6"x12") sometidos a compresión axial. El SRD está basado en un compuesto de planchas de acero estriado y caucho reciclado de llantas vehiculares en desuso. El caucho reciclado y el acero se disponen en elementos circulares de 0.50cm y 2mm, respectivamente. Ambos componentes tienen diámetro de 5cm y se colocan uno sobre otro de forma alternada para formar la estructura del SRD. Se ensayaron cuatro (04) tipos de probetas a los cuales se les denominaron: PC (probetas convencionales, sin SRD) y PM1, PM2 y PM3 (probetas modificadas, con SRD). Los datos experimentales sirvieron también para obtener la respuesta inelástica de los especímenes en el programa Abaqus. De los ensayos experimentales se observa una reducción de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad en las probetas modificadas respecto a la probeta convencional (según el ASTM C469). Los resultados muestran una mayor capacidad de disipar energía en las probetas modificadas debido a mayores deformaciones residuales en relación a la probeta convencional, sin cambio importante en la ductilidad; y también debido a que tanto el daño por compresión y tensión se concentran alrededor del SRD y estos son mayores en la probetas modificadas que en la probeta convencional. Además, el daño se desarrollan gradualmente en las probetas modificadas mientras que en la probeta convencional la falla se da casi inmediatamente después de experimentar daño.

palabras clave: Caucho reciclado, dispositivo acero-caucho (SRD), elementos finitos, probetas de concreto, propiedades mecánicas, disipación de energía.

ABSTRACT

In this study, the effect of the SRD on the behaviour of concrete was investigated by experimental and numerical analysis on concrete standard samples (6"x12") under compressive axial load. The SRD is made of ribbed steel plates and recycled rubber from scrapped tires. The recycled rubber and steel are disposed in circular elements of 0.5cm and 2mm thickness, respectively. Both components are 5cm in diameter and placed one on top the another, alternately to shape the structure of the SRD. Four (04) concrete type samples were tested which were named as: PC (conventional sample, no SRD added) and PM1, PM2 and PM3 (modified samples, SRD added). The experimental results data were used to obtain the inelastic response of the specimens through Abaqus program. The experimental results show a decrease of the compressive strength and the modulus of elasticity (obtained by the ASTM C469) in the modified specimens (PM) in comparison to the conventional specimens (PC). According to the results, the modified specimens develop more energy dissipation than the conventional specimens, because of an increase of the residual deformations once damage has begun, without important change in ductility; also due to that both the compression damage and the tension damage get concentrated around the SRD and major in the modified samples than in the conventional sample. Moreover, the damage develop gradually in the modified samples while the conventional sample the failure follows almost immediately to the initial damage.

keywords: Concrete specimens, energy dissipation, finite elements, mechanical properties, recycled rubber, steel rubber device (SRD).

INTRODUCCION

Se estima que las llantas en desecho es proporcional a la cantidad de llantas producidas, el cual para el año 2017 fue de 2.9 billones. De esta cantidad, en Estados Unidos, se tiene que el 43 % se dispone como desecho y solo el 8 % es usado en la industria de la construcción (Siddika et al., 2019). En el ámbito nacional el Banco Central de Reserva del Perú (BCR, 2019) indica que el sector del caucho creció un 24.2 % dentro del rubro de plásticos, caucho y productos químicos (Abugattas & Carnero, 2020) lo que significa un aumento del NFU (Neumáticos fuera de uso). Todo este panorama de una política que no toma en cuenta el reciclaje como un pilar de desarrollo va en contra del acuerdo pactado en los ODS (Objetivos del Desarrollo Sostenible) del cual Perú forma parte, con el objetivo de asegurar un crecimiento sostenible a nivel local y global.

Debido a esta preocupación es que se viene haciendo investigaciones para dar mayor uso del caucho por las propiedades que este ofrece. Mohajerani et al. (2020) menciona que el caucho tiene excelentes propiedades para ofrecer en el ámbito de la Ingeniería Geotécnica, tales como: capacidad de drenar, buena durabilidad, alta compresibilidad, baja presión de suelo, baja densidad y aislación.

También se vienen realizando investigaciones acerca de caucho triturado como aditivo en los pavimentos asfálticos donde se evidenció muy pocas fisuras por fatiga mejorando su desempeño (Shu & Huang, 2014). De igual forma se viene realizando investigaciones en concreto convencional de cemento Portland con adición de caucho triturado y fibras de acero. Así mismo, se está estudiando la adición de caucho triturado en concreto autocompactante donde se obtiene resultados similares al concreto convencional (Turatsinze & Garros, 2008).

En esta investigación se adiciona caucho y acero pero no en fibras o triturado, sino en

elementos circulares colocados uno sobre otro a modo de "sándwich" y que será embebido en el concreto y que tiene por nombre SRD (dispositivo acero-caucho, por sus siglas en inglés). La configuración del SRD se asemeja a un aislador elastomérico reforzado el cual sirve para reducir la energía de entrada al sistema. Aunque con la diferencia del propósito del acero en el conjunto ya que en el aislador elastomérico reforzado el refuerzo de acero tiene como función restringir el abultamiento lateral del caucho debido a la fuerza de compresión (Van Engelen, 2019); mientras que en el SRD, el objetivo es compatibilizar deformaciones entre el caucho y el concreto.

El objetivo de la presente investigación es la de estudiar el comportamiento del concreto con inclusión del SRD, sometido a compresión axial, desde el inicio de carga hasta la falla de los especímenes siendo la variable en estudio la cantidad de capas de caucho añadidas en el SRD. Para tal fin se hace uso de material reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU) con el cual se pretende reducir el efecto nocivo que tiene el desecho de estos materiales al medio ambiente.

La utilidad práctica de este trabajo, en el ámbito de la Ingeniería Civil, es usar el SRD en los encuentros de las vigas y columnas en estructuras aporticadas, comúnmente llamados nudos, puesto que es en esas zonas donde las estructuras aporticadas disipan energía mediante una formación progresiva de rótulas plásticas (considerando un modelo de plasticidad concentrada). La finalidad es la de dar protección a aquellas estructuras consideradas "comunes" ante sismos de intermedia a alta intensidad puesto que los dispositivos "modernos" de disipación de energía resultan costosos como para ser usadas en este tipo de estructuras.

La tesis esta dividida en cinco capítulos los cuales se resumen a continuación:

Capítulo I: Abarca el problema a resolver así como los objetivos y los límites en los cuales se enmarca la investigación. También se pone énfasis en la importancia del desarrollo de esta investigación a nivel académico y profesional con proyección a futuras investigaciones.

Capítulo II: Se habla del material de referencia que implica investigaciones parecidas anteriores relacionadas con mi investigación a partir del cual se forman las bases para comprender el proceso y resultados del presente trabajo. Se referencia investigaciones hechas en concreto con adición de caucho triturado y acero y de que manera estos afectan en el comportamiento elástico e inelástico del concreto.

Capítulo III: Se enfoca en la metodología a aplicar en la investigación, su enfoque, alcance, los materiales y equipos necesarios y el procedimiento a seguir con detalles de lo que se realizó durante la investigación. Se muestran las hipótesis a cada problema identificado, las variables y su operación.

Capítulo IV: Análisis de los resultados obtenidos de la investigación para luego contrastarlas con las hipótesis presentadas. Lo que se espera con esta investigación es incrementar la capacidad de deformación inelástica ante fuerzas de compresión del concreto con una esperada reducción en sus propiedades mecánicas de hasta 10 %. Al mismo tiempo brindar una alternativa de uso a los neumáticos en desecho en el diseño sismoresistente de edificaciones.

Capítulo V: Conclusiones de la investigación bajo los límites planteados y, recomendaciones para futuras investigaciones que permitan ampliar el conocimiento del uso del caucho reciclado en el concreto.

Referencias bibliográficas: Se culmina el trabajo presentado las referencias bibliográficas tomadas de libros, artículos y normas que se cogieron para la realización de los ensayos.

*Este trabajo está dedicado a mis seres queridos,
algunos que están conmigo y otros que ya se fueron. Pero sobre
todo, está dedicado a mi mismo por ser un soñador, hacedor y
valiente en la consecución de mis metas, objetivos y sueños.*

AGRADECIMIENTOS

A mi persona, por trabajar en mis objetivos constantemente

A mi familia, por ser un apoyo indispensable en mi vida

Al Ingeniero Javier Francisco Taipe Carbajál (docente de la Universidad Nacional De San Cristóbal De Huamanga), por haber aceptado ser asesor de esta tesis.

Al Ingeniero Norbert Luis Quispe Aucapuella (ex-docente de la Universidad Nacional De San Cristobal De Huamanga), por hablar del tema de disipación de energía en una de las clases de pregrado en su etapa de docente, a partir del cual inició la curiosa búsqueda de información que culminó en esta investigación.

Al Ing. Anibal Tafur Gutierrez, asistente de investigación en la Universidad Rice, Estados Unidos. Por asesorarme en esta investigación durante su docencia en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Al Ing. Luiz Ángel Gómez Cunya, docente de la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Por asesorarme en esta investigación para la presentación en el Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil (CONEIC) desarrollado en Puno, Perú, 2018.

INDICE GENERAL

Resumen	02
Introducción	04
Dedicatoria	07
Agradecimientos	08
Indice general	09
Indice de figuras	13
Indice de tablas	16
Glosario	17
Acrónimos y símbolos	18
Capítulo I: Planteamiento del problema	19
1.1. Descripción de la realidad problemática	19
1.2. Delimitación del problema	21
1.2.1. Espacial	21
1.2.2. Temporal	21
1.2.3. Temática y unidad de análisis	21
1.3. Formulación del problema	22
1.3.1. Problema general	22
1.3.2. Problemas específicos	22
1.4. Justificación e importancia	22
1.5. Limitaciones de la investigación	23
1.6. Objetivos	23
1.6.1. Objetivo general	23

1.6.2. Objetivos específicos	23
Capítulo II: Marco teórico	24
2.1. Antecedentes	24
2.1.1. Investigaciones internacionales	24
2.1.1.1. Principales aplicaciones del caucho reciclado en la construcción	24
2.1.1.2. Concreto con adición de caucho triturado	25
2.1.1.3. Concreto con adición de caucho triturado y fibras de acero	29
2.1.2. Investigaciones nacionales	33
2.2. Bases teóricas	33
2.2.1. Propiedades mecánicas del concreto	33
2.2.1.1. Resistencia a la compresión	33
2.2.1.2. Módulo de elasticidad	34
2.2.2. Ductilidad	34
2.2.3. Materiales hiperelásticos	34
2.2.4. Daño plástico del concreto (CDP)	35
2.3. Marco conceptual	37
2.3.1. Caucho	37
2.3.2. Dispositivo Acero - Caucho (SRD)	37
Capítulo III: Método de la investigación	38
3.1. Enfoque	38
3.2. Alcance	38
3.3. Diseño de investigación	39
3.4. Población y muestra	39

3.4.1. Población	39
3.4.2. Muestra	39
3.5. Hipótesis	39
3.5.1. Hipótesis general	39
3.5.2. Hipótesis específicas	40
3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional	40
3.6.1. Variables	40
3.6.1.1. Variable independiente	40
3.6.1.2. Variables dependientes	41
3.6.2. Indicadores	41
3.6.2.1. Indicador asociado a la variable independiente	41
3.6.2.2. Indicadores asociados a las variables dependientes	41
3.6.3. Operacionalización de variables	41
3.7. Técnicas e instrumentos	41
3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información	42
3.9. Desarrollo del trabajo de tesis	43
3.9.1. Habilitación de materiales	43
3.9.2. Elaboración de los dispositivos SRD	44
3.9.3. Especímenes de concreto	45
3.9.4. Ensayo de las probetas a rotura con galgas extensiométricas	46
3.9.5. Ensayo experimental	50
3.9.5.1. Rotura de probetas	50
3.9.5.2. Resistencia a la compresión uniaxial	53

3.9.5.3. Módulo de elasticidad	53
3.9.6. Análisis numérico en el programa Abaqus con inclusión de daño	55
3.9.6.1. Visualización de resultados en imágenes	55
3.9.6.2. Visualización de resultados en gráficas	80
3.9.7. Ductilidad de los especímenes de ensayo	84
Capítulo IV: Resultados	86
4.1. Contrastación de hipótesis	86
4.2. Análisis e interpretación	91
Capítulo V: Conclusiones	92
5.1. Conclusiones	92
5.2. Recomendaciones	94
5.3. Trabajos futuros	95
Referencias bibliográficas	96
Anexos	

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propuesta de ubicación del SRD en una edificación aporticada	21
Figura 2. Curvas del ensayo a compresión del concreto con adición de agregados tipo CR y FCR	27
Figura 3. Curvas del ensayo de carga - deflexión con adición de agregados tipo CR	28
Figura 4. Relación deformación-esfuerzo axial en probetas de clase C20 y C30	30
Figura 5. Relación deflexión-carga en vigas de concreto con adición de fibras de acero de clase C20	30
Figura 6. Relación deflexión-carga en vigas de concreto con adición de fibras de acero de clase C30	31
Figura 7. Resistencia a la compresión del concreto con inclusión de caucho triturado y fibras de acero	31
Figura 8. Módulo de elasticidad del concreto con inclusión de caucho triturado y fibras de acero	32
Figura 9. Relación esfuerzo-deformación axial del concreto con caucho	32
Figura 10. Relación esfuerzo-deformación axial del concreto con caucho triturado y fibras de acero	33
Figura 11. Curva real e idealizada de una relación esfuerzo-deformación	34
Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación del modelo CDP ante compresión uniaxial (izquierda) y tracción uniaxial (derecha)	36
Figura 13. Configuración del dispositivo SRD	38
DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	
Figura 14. Habilitación de acero	43

Probeta Modificada PM2

Figura 34. Esfuerzos axiales	67
Figura 35. Deformaciones axiales	68
Figura 36. Deformaciones plásticas	69
Figura 37. Daño en compresión	71
Figura 38. Daño en tensión	72

Probeta Modificada PM3

Figura 39. Esfuerzos axiales	74
Figura 40. Deformaciones axiales	75
Figura 41. Deformaciones plásticas	76
Figura 42. Daño en compresión	77
Figura 43. Daño en tensión	78
Figura 44. Gráfico esfuerzo-deformación axial: (a) PC, (b) PM1, (c) PM2 y (d) PM3	80
Figura 45. Gráfico esfuerzo-deformación plástica	82
Figura 46. Gráfico esfuerzo-daño en compresión	83
Figura 47. Gráfico esfuerzo-deformación bilineal: (a) PC, (b) PM1, (c) PM2 y (d) PM3	85

CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Figura 48. Distribución T-student para los resultados de la resistencia a la compresión	88
Figura 49. Distribución T-student para los resultados del módulo de elasticidad	89
Figura 50. Distribución T-student para los resultados de la ductilidad	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 01. Propiedades del concreto para distintos porcentajes de caucho en reemplazo del agregado grueso	26
Tabla 02. Coeficientes del modelo de Mooney Rivlin para el caucho reciclado	35
Tabla 03. Valores típicos de parámetros del modelo CDP	36
Tabla 04. Operacionalización de variables	42
Tabla 05. Datos geométricos de las probetas elaboradas	48
Tabla 06. Resistencia pico y deformación axial asociada	51
Tabla 07. Resistencia a la compresión de las probetas ensayadas: $f'c$	53
Tabla 08. Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas: E	54
Tabla 09. Ductilidad de cada espécimen: μ	84
Tabla 10. Valor T-student para los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes modificados	87
Tabla 11. Valor T-student para los resultados del módulo de elasticidad de los especímenes modificados	89
Tabla 12. Valor T-student para los resultados de la ductilidad de los especímenes modificados	90

Glosario

Concreto.- También llamado hormigón, es un material usado comunmente en la construcción de estructuras de diverso tipo y es muy resistente a cargas de compresión.

Caucho.- Material que forma parte de aquellos elementos denominados hiperelásticos debido a su gran capacidad de deformación sin recibir daño. [uede actuar como aislante acústico y auditivo.

Dispositivo SRD.- Elemento compuesto de acero y caucho dispuestos uno sobre otro de forma alternada similar a un aislador sísmico elastomérico y embebido en el concreto. El caucho tiene espesor de 0.5 cm y el acero, 2.0 mm, ambos con diámetro de 5.0 cm.

Propiedades mecánicas del concreto.- Propiedades cuantificables del concreto en la zona elástica. Para esta investigación las propiedades mecánicas estudiadas son el módulo de elasticidad, módulo de Poisson y resistencia a la compresión.

Elementos finitos.- Modelo matemático que permite aproximar la solución de ecuaciones diferenciales.

Curva esfuerzo-deformación.- Gráfica en donde se observa la respuesta tensión-deformación de un elemento ante una carga externa.

Acrónimos

PC	: Probeta convencional
PM	: Probeta modificada
SRD	: Dispositivo acero - caucho, por sus siglas en inglés
CDP	: Concrete Damage Plasticity
NFU	: Neumáticos fuera de uso
ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials

Símbolos

f'_{c0}	: Resistencia pico del espécimen	$[kgf/cm^2]$
f'_c	: Resistencia a la compresión del espécimen de concreto	$[kgf/cm^2]$
ε_0	: Deformación unitaria axial pico del espécimen	$[mm/m]$
ε_u	: Deformación unitaria axial última del espécimen	$[mm/m]$
E	: Módulo de elasticidad del espécimen	$[kgf/cm^2]$
μ	: Ductilidad del espécimen	[-]
X _y	: Deformación de fluencia efectiva	$[mm/m]$
X _u	: Deformación última efectiva	$[mm/m]$

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.- Descripción de la realidad problemática

La costa del pacífico junto a otros países asiáticos y de oceanía y algunas ciudades norteamericanas se encuentran en la zona llamada "Cinturón de fuego del pacífico". Particularmente la costa peruana se encuentra influenciada por un borde de subducción en el que la placa de nazca se introduce por debajo de la placa sudamericana, convirtiéndola en una de las zonas de mayor sismicidad en el mundo.

Algunos llegan a ser terremotos devastadores como los registrados recientemente en Chile (2010) y México (2017), que causó la pérdida de vidas humanas, bienes materiales y cuantiosas sumas económicas. Muchas de ellas debido al colapso de las estructuras y porque la respuesta humana ante estos eventos no es precisamente la más adecuada.

Si bien nuestra norma toma en cuenta el riesgo sísmico de cada zona producto de años de investigación, el tratar de describir un problema tan complejo con una ecuación muy sencilla como es $ZUCS/R$ y a esto sumado el hecho de que los terremotos son eventos hasta ahora altamente impredecibles, no podemos asegurar que una edificación pueda cumplir su vida útil incluso al día siguiente de haber sido construido puesto que inteligentemente se acepta daño en las estructuras sometidas a un sismo severo.

El gran problema es que no podemos, con una ecuación tan sencilla, describir el desempeño de la edificación y por lo tanto saber que tanta deformación plástica es capaz de asumir antes de que llegue al colapso. Hoy en día existen mecanismos que absorben parte de la energía generada por el sismo como los aisladores de base y disipadores de energía; sin embargo, estos elevan grandemente el costo del proyecto a tal punto que la norma obliga a utilizarse únicamente en edificaciones

importantes como hospitales, puentes importantes y otras edificaciones que tengan justificación técnica.

¿Pero que pasa con las edificaciones comunes y corrientes?

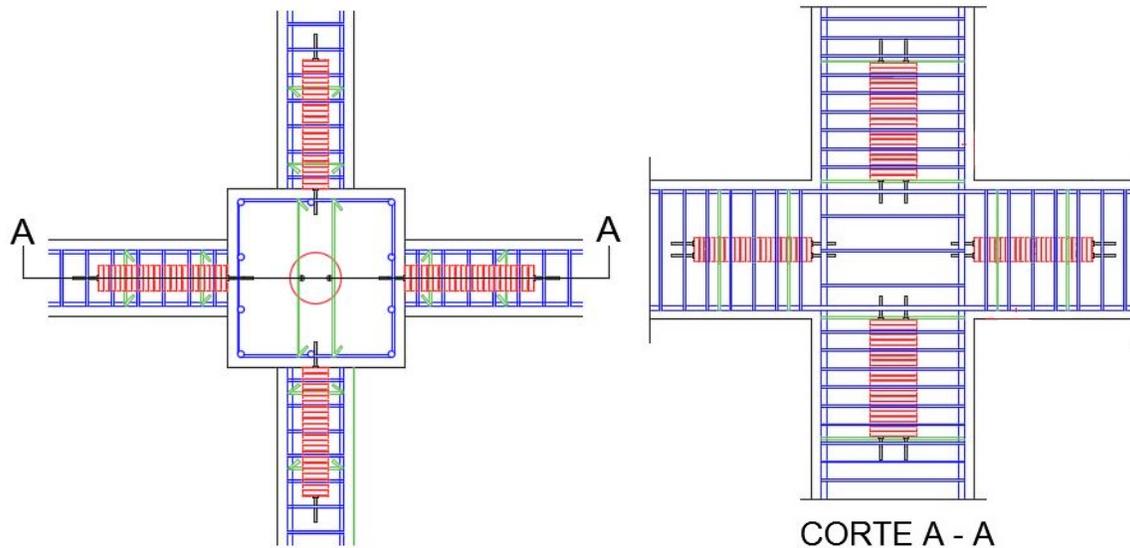
Lamentablemente en Perú, la construcción informal es cosa habitual y no se está seguro si la vivienda resistirá a un evento sísmico y son exactamente estas edificaciones las que más sufren. Es necesario y urgente implementar sistemas que protejan a las viviendas del ciudadano de a pie y que estén al alcance de la economía de las personas. Lo dicho se puede lograr agregando al elemento con el que se construye (concreto en este caso), un material capaz de recibir parte de la energía proveniente del sismo y de esa forma mantener la configuración estructural de la edificación y asegurar la estabilidad de la misma. Dicho material generaría en el sistema una zona débil que induciría a disipar energía a travez de mayor desplazamiento plástico, lo cual daría a la estructura un comportamiento más dúctil antes que una falla frágil, respetando la filosofía de diseño sismoresistente.

Adicional a lo mencionado, se tiene el problema del rápido crecimiento del rubro de plásticos en nuestro país, en donde el sector del caucho creció respecto a años anteriores lo que significa asu vez un incremento de la cantidad de neumáticos en circulación como también en desecho, un problema muy serio para el medio ambiente.

El uso del dispositivo propuesto (SRD) se usaría en los encuentros viga-columna como se muestra en la figura 1; ya que las edificaciones aporticadas disipan energía en esos puntos críticos, tomando en cuenta un modelo de plasticidad concentrada.

Figura 1

Ubicación del SRD en una edificación aporcionada.



Nota. Elaboración propia.

1.2.- Delimitación del problema

1.2.1.- Espacial

Dado las características de la investigación y su enfoque global, espacialmente la investigación abarca el concreto convencional usado en la construcción de edificaciones.

1.2.2.- Temporal

Por su enfoque global, la investigación toma en cuenta las normas actuales así como modelos matemáticos aceptados por la Ingeniería acerca de los modelos constitutivos del comportamiento del concreto e investigaciones más recientes para el desarrollo de los ensayos y análisis e interpretación de resultados.

1.2.3.- Temática y unidad de análisis

La unidad de análisis son las probetas de concreto a las que se les someterá a experimentación y la temática es estudiar la resistencia alcanzada, el módulo de elasticidad y las características

inelásticas de los especímenes sin adición del SRD y con adición del SRD, que de ahora en adelante se les denominarán probetas convencionales y probetas modificadas, respectivamente.

1.3.- Formulación del problema

1.3.1.- Problema General

¿Se mejora el comportamiento a compresión del concreto al agregar el dispositivo SRD ?

1.3.2.- Problemas Específicos

1.- ¿Cuánta diferencia habrá en la resistencia a la compresión de las probetas modificadas respecto de la probeta convencional?

2.- ¿Cuánta diferencia habrá en el módulo de elasticidad de las probetas modificadas respecto de la probeta convencional?

3.- ¿Cuánto es la deformación última de las probetas modificadas respecto de la probeta convencional ?

1.4.- Justificación e importancia

La presente investigación es muy importante porque estudia una nueva forma de aumentar la capacidad de deformación del concreto para su mejor aprovechamiento en estructuras ubicadas en zonas de alta sismicidad. Para lo cual se adiciona el SRD compuesto de caucho y acero y con proyección a futuras investigaciones al respecto.

Es nuestro compromiso como país respetar el acuerdo pactado en la ODS (Objetivos del Desarrollo Sostenible) firmado el 23 de Septiembre de 2015. En total fueron 17 los objetivos acordados para tener un desarrollo sostenible a nivel local y global, entre los cuales se pueden mencio-

nar algunos relacionados a esta investigación:

-Objetivo 9.- Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

-Objetivo 13.- Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

1.5.- Limitaciones de la investigación

Equipos y financiamiento insuficientes para desarrollar todos los ensayos necesarios para este tipo de investigación.

1.6 . - Objetivos

1.6.1.- Objetivo general

Estudiar el comportamiento lineal y no lineal de las probetas de concreto mediante la adición del dispositivo SRD.

1.6.2.- Objetivos específicos

- 1.- Obtener la resistencia a la compresión de los especímenes modificados y convencionales.
- 2.- Obtener el módulo de elasticidad de los especímenes modificados y convencionales.
- 3.- Obtener la ductilidad de la probeta convencional y probetas modificadas mediante el ensayo experimental.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1.- Antecedentes

2.1.1.- Investigaciones internacionales

2.1.1.1.- Principales aplicaciones del caucho reciclado en la construcción

Las aplicaciones más difundidas con este sistema es en el área de pavimentos en el que los resultados son bastante satisfactorios, también se continúan realizando investigaciones acerca de su mejor aprovechamiento en mezclas de concreto. Así mismo, cabe mencionar que la aplicación con más beneficios en cuanto a seguridad de las edificaciones pero con costos elevados son los aisladores sísmicos los cuales no forman parte de esta investigación. Sin embargo, el hecho de colocar un material cuya resistencia es mucho menor que la del concreto hace que ciertas propiedades del conjunto se vean reducidas.

Las aplicaciones más difundidas de caucho en la Ingeniería Civil son, como menciona Shu & Huang (2014):

- En mezclas de pavimentos asfálticos
- Como aditivo en concreto de cemento Portland
- Usado como reductor de peso; y
- Llantas enteras como barreras de protección, parachoques, arrecifes artificiales, etc.

Se puede citar acerca de la inclusión de caucho triturado en pavimentos:

[...] Emplear residuos de caucho en este tipo de aplicaciones representa, además de las importantes ventajas ambientales y económicas expuestas previamente, mejoras técnicas en este tipo de productos, como el incremento de la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga, lo que acarrea, sin embargo, algunas pérdidas en propiedades como el módulo elástico y la resistencia a la compresión.(Peláez, Velásquez & Giraldo, 2017, p.36)

También mencionan que al incluir caucho triturado en una matriz de concreto Portland se puede mejorar la tenacidad, ductilidad, aislamiento sísmico y reduce la densidad; sin embargo, esto disminuye la resistencia a la compresión y tracción por lo que las investigaciones respecto al aprovechamiento más óptimo del caucho en el concreto aún es tema de investigación. Una buena alternativa para mejorar lo anterior es incluir además de caucho triturado, fibras de acero el cual mantiene las características que se buscan y reduce el efecto negativo en la resistencia.

2.1.1.2.- Concreto con adición de caucho triturado

La adición de caucho triturado sin ningún tratamiento previo reduce la densidad del concreto cuanto mayor es el porcentaje de caucho triturado. Flores Medina, N., Flores Medina, D., Hernández-Olivares & Navacerrada (2017) experimentaron reemplazando el agregado grueso por caucho en incrementos de 20 % hasta llegar al 100 % en donde observó que la densidad va decreciendo a medida que aumenta el porcentaje de caucho, y lo mismo pasa con la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. En la tabla 1, se observa que al adicionar caucho triturado decrecen las propiedades elásticas del concreto; sin embargo, se observó también que el concreto es capaz de absorber mayor energía cuando el porcentaje de caucho es mayor hasta llegar al 80 %.

Tabla 1

Propiedades del concreto para distintos porcentaje de caucho en reemplazo del agregado grueso.

% Caucho de reemplazo	Densidad (kg/m³)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)
0 %	2422	47.78	8.88
20 %	2264	27.71	5.91
40 %	2156	17.71	3.93
60 %	2026	13.58	3.80
80 %	1858	8.60	1.06
100 %	1742	6.33	0.39

Adaptado de "Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling", por Flores Medina, N. et al., 2017, *Construction and Building Materials*, 144, p. 567.

En las figura 02 y 03 se observa la gráfica esfuerzo - deformación axial y carga-deflexión, respectivamente, para distintos porcentajes de caucho añadido en reemplazo de agregado grueso, en donde "CR" son las muestras con solo adición de caucho y "FCR", las muestras con adición de acero o fibras de plástico parcialmente cubiertos de caucho.

Resultados similares respecto a la reducción de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad fueron obtenidos por Khaloo, Dehestani & Rahmatabadi (2008). Este último recomienda no reemplazar más del 25 % del agregado por caucho para no reducir la resistencia del concreto considerablemente. En ambas investigaciones se concluye también que el caucho en el concreto aumenta las deformaciones y por lo tanto la ductilidad del concreto.

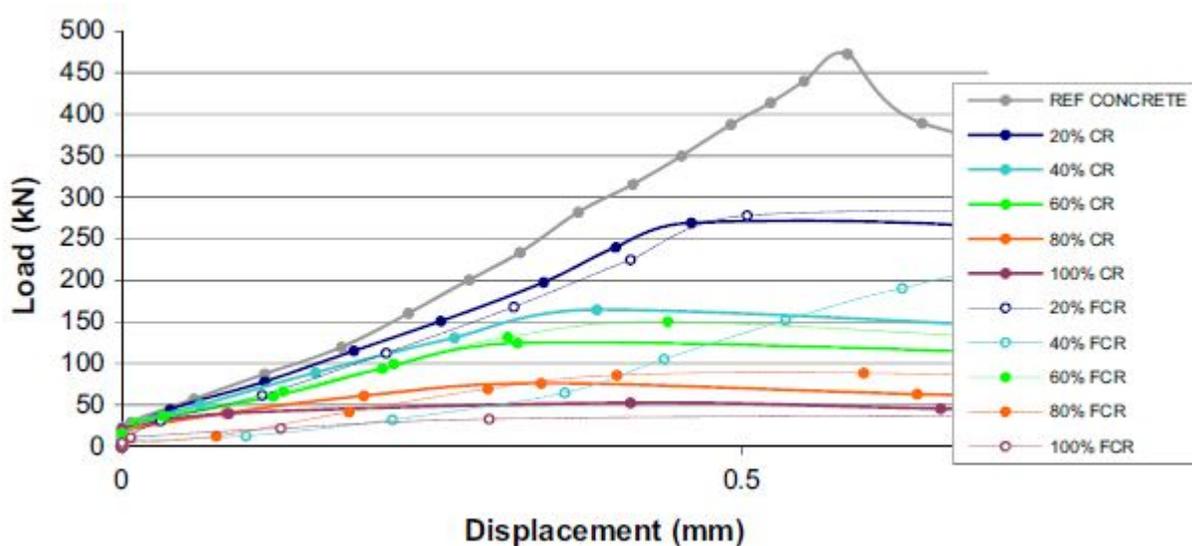
Por otro lado, Roychand et al. (2020), realizaron una revisión de las investigaciones acerca del concreto con adición de caucho en los últimos 30 años, mencionan en una de sus conclusiones que dar un tratamiento previo al caucho puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Tales tratamientos incluyen el usar un componente solvente como el ethanol el cual resulta en un incremento de la resistencia a la compresión cuando el caucho reemplaza en 10 % al agregado.

Mientras que el módulo de elasticidad puede llegar a valores iguales o mayores que el concreto con caucho sin tratamiento cuando este es remojado en agua o añadiéndoles pasta de cemento.

Benazzouk, Douzane, Mezreb & Queneudec (2006), estudiaron las propiedades del concreto con adición de caucho triturado en reemplazo de volumen de cemento, pero esta vez con inyección de aire. Los resultados muestran una mejor trabajabilidad del concreto con caucho e inyección de aire respecto al concreto con adición de caucho sin inyección de aire. Los resultados son similares en cuanto a propiedades físico-mecánicas: reducción del peso, menor resistencia a la compresión y menor módulo de elasticidad.

Figura 2

Curvas del ensayo a compresión del concreto con adición de agregados tipo CR y FCR

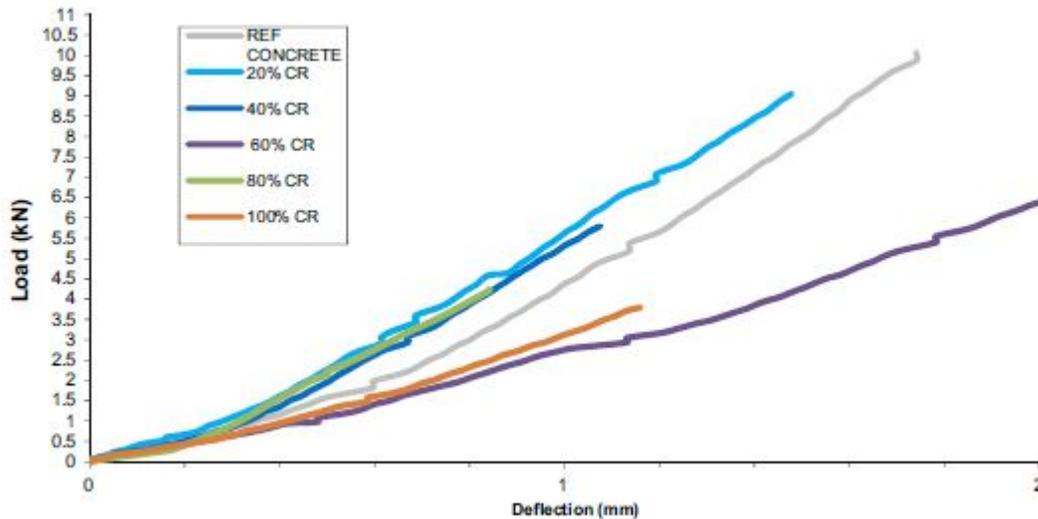


Nota. Adaptado de "Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling" (p. 568), por Flores Medina, N. et al., 2017, *Construction and Building Materials*, 144.

Gholampour, Ozbakkaloglu & Hassanli (2017), investigaron el efecto que tiene una presión de confinamiento activa sobre probetas de concreto con caucho triturado. Se encontró que a mayor cantidad de caucho presente las deformaciones axiales y transversales decrecen ante una presión de confinamiento constante, e incrementan ante un aumento de la presión de confinamiento. Así mis-

Figura 3

Curvas del ensayo de carga - deflexión con adición de agregados tipo CR



Nota. Adaptado de "Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling" (p. 568), por Flores Medina, N. et al., 2017, *Construction and Building Materials*, 144.

mo, la resistencia pico alcanzada y sus deformaciones axiales asociadas a esta resistencia decrecen con el incremento de caucho, pero incrementan cuanto mayor es la presión de confinamiento; lo contrario ocurre con las deformaciones transversales.

También se estudio el efecto que tiene el caucho triturado en las propiedades térmicas del concreto, donde se encontró que el caucho triturado o en fribas reduce la conductividad térmica del concreto (Flores Medina, N., 2017). Igual resultado se obtuvo en planchas de concreto donde se obtuvo que el caucho no solo mejora las propiedades térmicas del concreto mediante una reducción del coeficiente de conductividad térmica sino también un aumento del coeficiente de absorción de sonido (Sukontasukkul, 2009).

2.1.1.3.- Concreto con adición de caucho triturado y fibras de acero

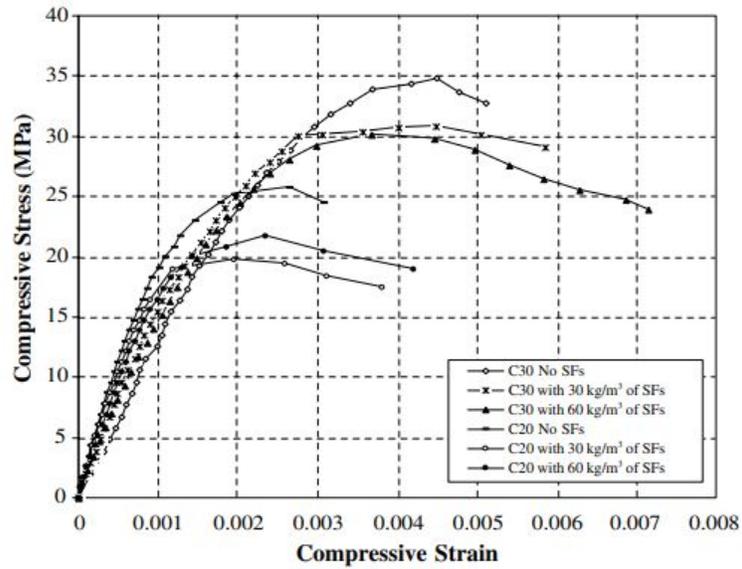
Aunque la investigación presentada en esta tesis no incluye caucho triturado o acero en fibras, sí es necesario tener conocimiento de cuales son los efectos que tiene la inclusión de este último en el concreto ya que el SRD incluye caucho y acero en conjunto.

En investigaciones realizadas en concreto con inclusión de fibras de acero solamente, se llega a la conclusión de que la adición de fibras de acero incrementa la resistencia a flexión, la ductilidad y la resistencia post-fisuración (Holschemacher, Mueller & Ribakov, 2010). Aunque reduce la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad (Altun, Haktanir & Ari, 2007). Este último recomienda un incremento de 30kg/m³ en volumen de fibras de acero ya que cantidades mayores a este no refleja mejoras sustanciales en las propiedades del concreto como se muestra en las figuras 4, 5 y 6. Donde SF, RC y SFARC son siglas para: fibras de acero, concreto reforzado y concreto reforzado con adición de fibras de acero (por sus siglas en inglés).

Noaman, Abu Bakar & MD. Akil (2016) y Noaman, Abu Bakar & MD. Akil (2017) realizaron investigaciones respecto a la inclusión tanto de caucho triturado y fibras de acero en concreto. Los resultados muestran que la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se reducen por la presencia del caucho pero esta reducción es menor que un concreto con caucho triturado únicamente, por la presencia de las fibras de acero como muestran las figuras 7 y 8. También se evidenció un incremento de la ductilidad como se observa en la figura 9 (concreto con caucho triturado, únicamente) y figura 10 (concreto con caucho triturado y fibras de acero) por fines comparativos, donde el caucho reemplaza al agregado en porcentajes de 5 %, 10 % y 15 %. Adicional a lo anterior, los resultados indican que el caucho triturado y las fibras de acero aumentan la dureza a compresión del concreto.

Figura 4

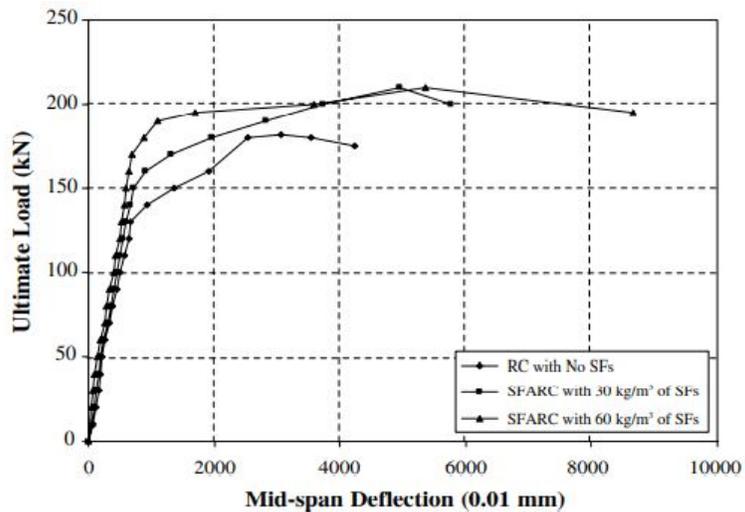
Relación deformación-esfuerzo axial en probetas de clase C20 y C30.



Nota. Adaptado de "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete en RC beams" (p. 656), por F. Altun et al., 2006, *Construction and Building Materials*, 21.

Figura 5

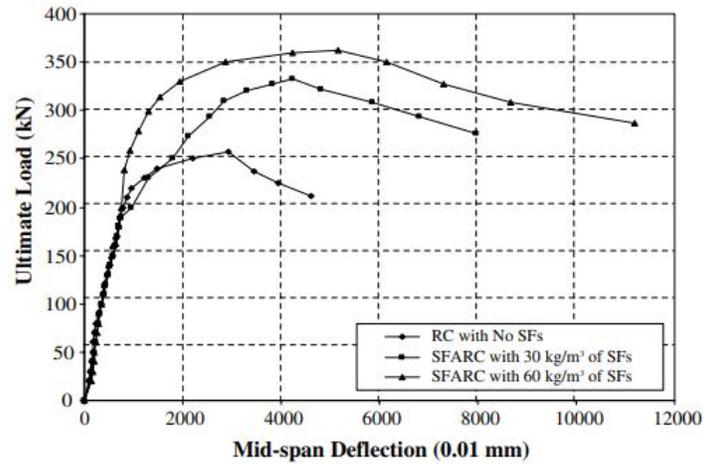
Relación deflexión-carga en vigas de concreto con adición de fibras de acero de clase C20.



Nota. Adaptado de "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete en RC beams" (p. 659), por F. Altun et al., 2006, *Construction and Building Materials*, 21.

Figura 6

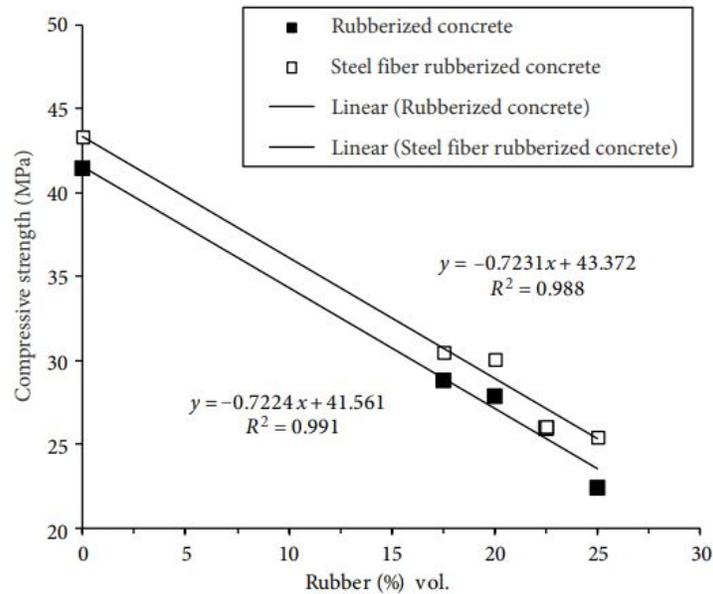
Relación deflexión-carga en vigas de concreto con adición de fibras de acero de clase C30.



Nota. Adaptado de "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete en RC beams" (p. 659), por F. Altun et al., 2006, *Construction and Building Materials*, 21.

Figura 7

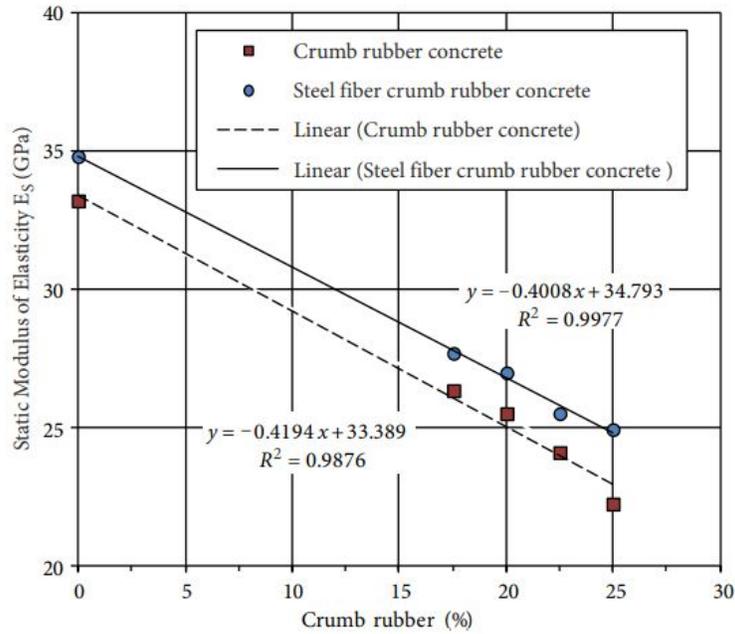
Resistencia a la compresión del concreto con inclusión de caucho triturado y fibras de acero.



Nota. Adaptado de "Investigation on the Mechanical Properties of Rubberized Steel Fiber Concrete" (p. 83), por Noaman et al., 2017, *Engineering Structures and Technologies*, 9(2).

Figura 8

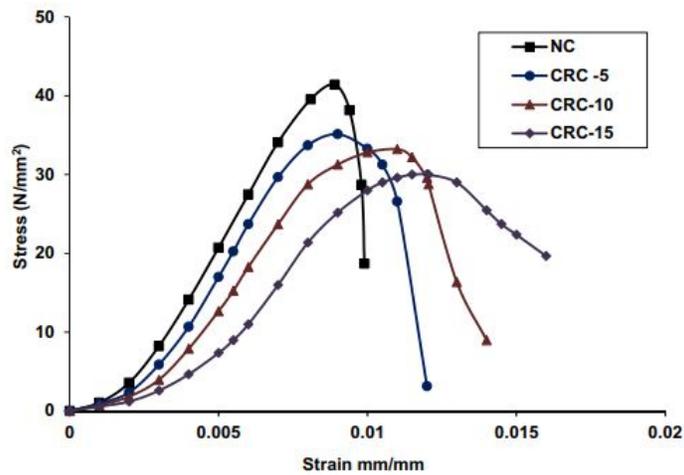
Módulo de elasticidad del concreto con inclusión de caucho triturado y fibras de acero.



Nota. Adaptado de "Investigation on the Mechanical Properties of Rubberized Steel Fiber Concrete" (p. 83), por Noaman et al., 2017, *Engineering Structures and Technologies*, 9(2).

Figura 9

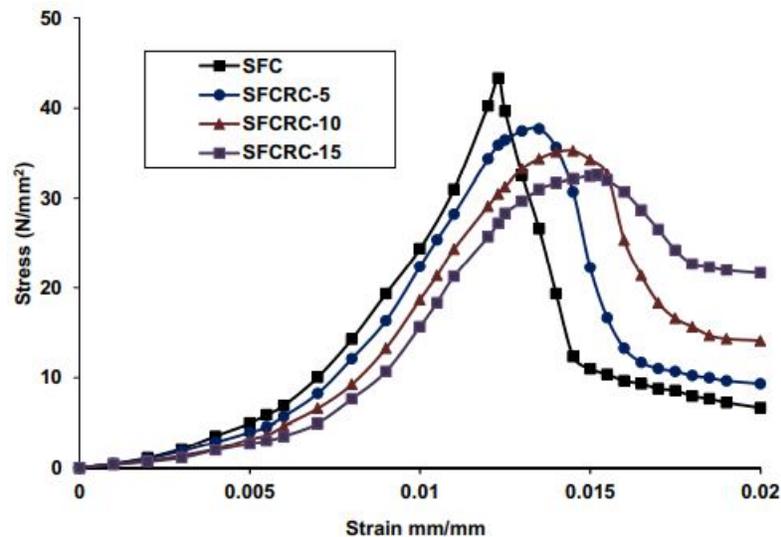
Relación esfuerzo-deformación axial del concreto con caucho.



Nota. Adaptado de "Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete" (p. 168), por Noaman et al., 2016, *Construction and Building Materials*, 115.

Figura 10

Relación esfuerzo-deformación axial del concreto con caucho triturado y fibras de acero.



Nota. Adaptado de "Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete" (p. 168), por Noaman et al., 2016, *Construction and Building Materials*, 115.

2.1.2.- Investigaciones nacionales

No se encontró investigaciones relacionados al tema en el ámbito local, regional y nacional.

2.2.- Bases teóricas

2.2.1.- Propiedades mecánicas del concreto

2.2.1.1.- Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión del concreto se cuantifica mediante un ensayo de carga de probetas estandarizadas de concreto a través del equipo de ensayo universal. La resistencia como tal debe ser medido en la zona central de las probetas donde prevalecen los esfuerzos axiales, y no en los extremos ya que se generan esfuerzos triaxiales.

2.2.1.2.- Módulo de elasticidad

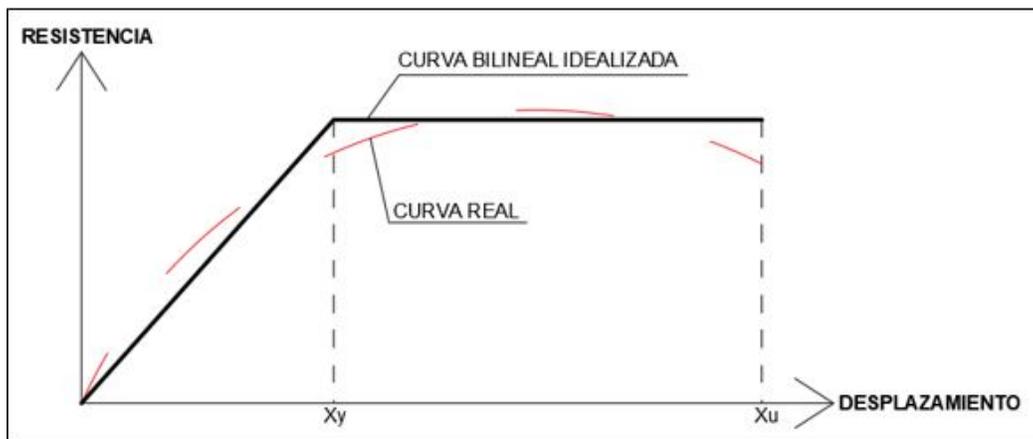
El módulo de elasticidad se define como el esfuerzo entre deformación unitaria medidos en el rango elástico (σ/ε). Para el trabajo experimental el módulo de elasticidad se cuantificará según el ASTM C469.

2.2.2.- Ductilidad (μ)

La ductilidad se define como el cociente del desplazamiento último y el desplazamiento de fluencia ($\frac{X_u}{X_y}$) como se indica en la figura 11.

Figura 11

Curva real e idealizada de una relación esfuerzo-deformación.



Nota. Elaboración propia.

2.2.3.- Materiales hiperelásticos

Son aquellos materiales que poseen gran capacidad de deformación y recuperación de la deformación a su condición original, es decir, sin sufrir daño (Shahzad, Kamranb, Zeeshan Siddiquia & Farhana, 2015). Uno de esos tipos de materiales es el caucho. La hiperelasticidad es un

modelo que trata de describir la respuesta de estos materiales ante una fuerza externa, de los cuales el modelo de Yeoh y el de Arruda Boyce demostraron ser más estables que los otros modelos constitutivos. Para esta investigación se usó el modelo de Yeoh cuyos coeficientes fueron obtenidos a partir de la investigación realizada por U. Gudsoorkar & R. Bindu, 2021 y usadas en el modelamiento de los especímenes en el programa Abaqus. Los valores se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Coefficientes del modelo de Yeoh para materiales hiperelásticos.

$C_{10}(Mpa)$	$C_{20}(Mpa)$	$C_{30}(Mpa)$	D_1	D_2	D_3
0.51985	-0.292015	0.17925	0.000	0.000	0.000

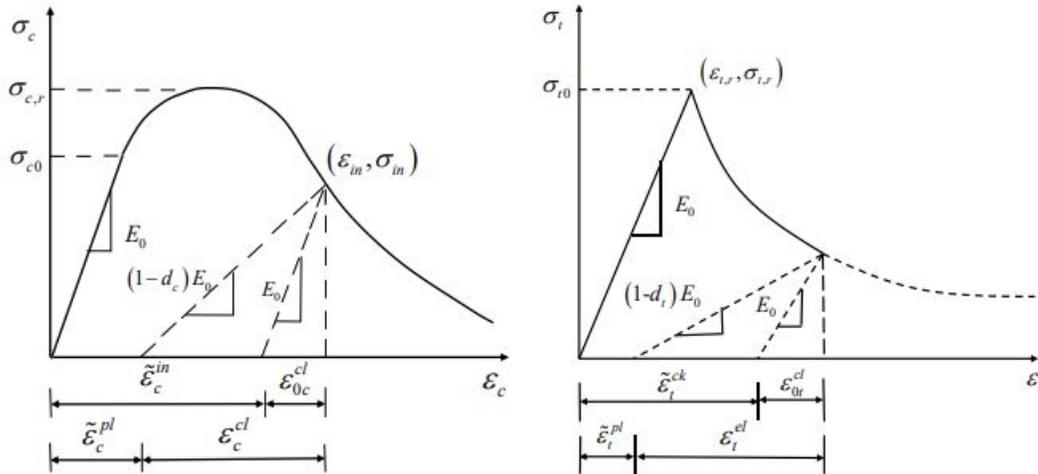
Tomada de "Computer simulation of hyper elastic re-treaded tire rubber with ABAQUS", por U. Gudsoorkar & R. Bindu, 2021, *Materials Today: Proceedings*, 43(2), pp. 1992-2001.

2.2.4.- Daño plástico del concreto (CDP)

CDP (Concrete Damage Plasticity) es un modelo constitutivo que describe el daño y el desarrollo del agrietamiento del concreto, por compresión o tracción mediante principios de: punto de fluencia, patrón de flujo y un patrón de histéresis (Qingfu, Wei & Yihang, 2020). Las curvas esfuerzo-deformación unitaria que describe el modelo CDP se muestra en la figura 12.

Figura 12

Curvas esfuerzo-deformación del modelo CDP ante compresión uniaxial (izquierda) y tracción uniaxial (derecha).



Nota. Adaptado de "Parameter calculation and verification of concrete plastic damage of ABAQUS"(p. 4), por L. Qingfu, G. Wei & K. Yihang, 2020, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 794.

Para el caso del concreto se tienen valores típicos recomendados de algunos parámetros necesarios para aplicar el modelo CDP en el programa Abaqus (ver tabla 3). Estos valores han demostrado describir correctamente el agrietamiento del concreto (Qingfu et al., 2020).

Tabla 3

Valores típicos de parámetros del modelo CDP.

Ψ°	λ	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

Tomada de "Parameter calculation and verification of concrete plastic damage of ABAQUS", por L. Qingfu, G. Wei & K. Yihang, 2020, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 794, p. 4.

Donde:

Ψ° = Ángulo de dilatación.

λ = Excentricidad.

f_{b0} = Resistencia a compresión biaxial.

f_{c0} = Resistencia a compresión uniaxial.

K = Parámetro que controla la superficie de fluencia.

μ = Parámetro de viscosidad.

2.3.- Marco conceptual

2.3.1.- Caucho

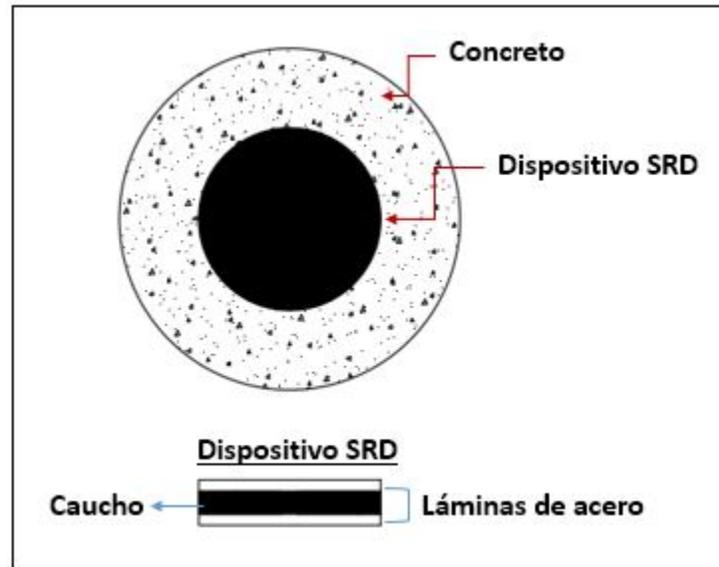
El caucho es un material perteneciente a un grupo de elementos llamados elastómeros que tienen elevada capacidad de deformación ante esfuerzos pequeños (Van Engelen, 2019). El caucho reciclado si bien ya tiene cierto desgaste, a demostrado ser capaz de generar beneficios en pavimentos y en la disipación de energía en el concreto. Y aunque según la bibliografía revisada el agregar caucho reciclado reduce la gran mayoría de la propiedades mecánicas del concreto, también las podemos mejorar incluyendo acero el cual se planea incluir en forma de láminas.

2.3.2.- Dispositivo Acero - Caucho (SRD)

El dispositivo SRD es un elemento compuesto de acero y caucho colocados de forma alternada, similar a la configuración que tiene un aislador elastomérico reforzado. Lo mencionado se observa en la figura 13. Las láminas de acero y el caucho tienen espesores de 2mm y 5mm, respectivamente; ambos tienen un diámetro de 5.0 cm. Las láminas de acero son corrugadas de tal manera que pueda brindar adherencia y evitar el contacto directo entre el caucho y el concreto. Sin embargo, las zonas laterales sí están en contacto directo con el concreto. El caucho es obtenido a partir de llantas en deshuso sin darles algún tratamiento especial más que adecuarlos a la forma circular deseada.

Figura 13

Configuración del dispositivo SRD.



Nota. Elaboración propia.

CAPITULO III: METODO DE LA INVESTIGACION

3.1.- Enfoque

Cuantitativo. De acuerdo a Borja (2012), consiste en la recolección de datos y formulación de una o varias hipótesis que luego serán sometidas a prueba que finalmente serán correctas o descartadas. Al final la teoría propuesta se puede extender a un rango más amplio.

3.2.- Alcance

Explicativo, el cual permite describir el comportamiento de una o varias variables en función de otra (Supo, 2012).

3.3.- Diseño de investigación

Tipo experimental (experimento verdadero), cumple con el grupo control a los cuales se les somete a experimentación de forma premeditada con el propósito de cumplir los objetivos de la investigación (Supo, 2012).

3.4.- Población y muestra

3.4.1.- Población

La población es infinita, ya que se estudia el comportamiento del concreto convencional para construir las diferentes estructuras de concreto armado, sin inclusión de aditivos.

3.4.2.- Muestra

La muestra es no-probabilística y de selección experta, ya que se obtienen de forma intencional doce (12) especímenes con características predeterminadas y que luego serán ensayadas en laboratorio.

3.5.- Hipótesis

3.5.1.- Hipótesis general

Si se incluye el SRD, se mejora el comportamiento a compresión del concreto mediante una mejor respuesta inelástica.

3.5.2.- Hipótesis específicas

1. Si se incluye el SRD en la estructura del concreto, la resistencia a la compresión se reduce en un 10 %.
2. Si se incluye el SRD en la estructura del concreto, el módulo de elasticidad se reduce en un 10 %.
3. Al incluir el SRD, las probetas modificadas alcanzan ductilidades 50 % mayores a la probeta convencional.

3.6.- Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

3.6.1.- Variables

Las variables son fenómenos o eventos estudiados que pueden ser medidos y tras analizarlos se llegan a resultados. Por su naturaleza, pueden ser variables dependientes o independientes.

3.6.1.1.- Variable independiente

Representa los factores que constituirían la causa, siendo que previamente han demostrado ser factores de riesgo para el problema que se estudia en el nivel investigativo relacional [...] (Supo, 2012, p.9).

Para la presente investigación la variable independiente es el número de capas de caucho (N) en el SRD.

3.6.1.2.- Variables dependientes

Son aquellas que dependen de la variable independiente. Para esta investigación son:

- Resistencia a la compresión.
- Módulo de elasticidad.
- Ductilidad.

3.6.2.- Indicadores

Los indicadores son conceptos que si bien pueden ser medidos, estos no son observables directamente. Tendremos indicadores asociados a la variable independiente y a las variables dependientes.

3.6.2.1.- Indicador asociado a la variable independiente

- Número de capas de caucho entre láminas de acero, N .

3.6.2.2.- Indicadores asociados a las variables dependientes

- Resistencia a la compresión, $f'c$
- Módulo de elasticidad, E
- Ductilidad, μ

3.6.3.- Operacionalización de variables

3.7.- Técnicas e instrumentos

Recopilación de datos

- Equipo de ensayo universal

Tabla 4*Operacionalización de variables*

Variable	Indicador	Medida	Método
Número de capas de caucho	N	-	-
Resistencia a la compresión	$f'c$	kgf/cm^2	Ensayo de compresión uniaxial ASTM C469
Módulo de elasticidad	E	kgf/cm^2	
Ductilidad	μ	-	

Elaboración propia.

- Galgas extensiométricas
- Equipo receptor de datos
- Balanza digital

Análisis de datos

- Microsoft Excel
- Abaqus CAE V.2020

Editor de texto

- Miktex
- Texstudio

Equipo

- Computador portátil

3.8.- Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

La técnica estadística para la obtención de los datos necesarios para realizar el análisis será el promedio aritmético y su desviación estándar asociado.

3.9.- Desarrollo del trabajo de tesis

3.9.1.- Habilitación de materiales

Acero.- El acero usado fue la plancha estriada LAC de 2.0 mm de espesor y habilitadas en formas circulares de 5.0 cm de diámetro. Ver figura 14. Se usó planchas estriadas con el objetivo de brindar una mejor adherencia entre el SRD y el concreto y evitar que exista un área mayor de contacto directo entre el caucho y el concreto.

Figura 14

Habilitación de acero.



Nota. Elaboración propia.

Caucho.- El caucho se obtuvo de llantas de vehículos en desuso como se observa en la figura 15. Las llantas recicladas se cortaron de tal manera de conseguir solo la zona que compone el caucho y de ser el caso, presencia de lona. Luego fueron habilitadas dándoles la forma circular de 5.0 cm de diámetro y 0.5 cm de espesor requeridos.

Agregados grueso y fino, y cemento.- Los agregados grueso y fino fueron traídos de la zona de Chacco, en la región Ayacucho; el cemento utilizado fue del tipo I.

Figura 15

Habilitación de caucho de llantas vehiculares en desuso.



Nota. Elaboración propia.

Figura 16

Control de dimensiones del caucho habilitado.



Nota. Elaboración propia.

3.9.2.- Elaboración de los dispositivos SRD

Los SRD se fabricaron para cada espécimen de ensayo: PM1, PM2 y PM3. El dispositivo para la probeta PM1 contiene una capa de caucho intercalada con una lámina de acero, el dispositi-

vo para la probeta PM2 contiene dos (02) capas de caucho intercaladas con una lámina de acero y el dispositivo para la probeta PM3 contiene tres (03) capas de caucho intercalados con una lámina de acero. Lo mencionado se muestra en la figura 17. La unión de las capas de caucho con las láminas de acero no se realizó mediante un proceso de vulcanización o usando pernos; en cambio se usó un hilo lo suficientemente delgado y a la vez resistente, con el objetivo de que durante el ensayo a compresión el caucho se pueda desplazar respecto al acero y de esa forma, disipar energía.

3.9.3.- Especímenes de concreto

Las probetas de concreto se elaboraron según dosificación de diseño para una resistencia de 210 kgf/cm². En total fueron doce (12) probetas los cuales se distribuyeron en tres (03) muestras de cada espécimen (PC, PM1, PM2 y PM3). La preparación de las muestras se realizaron en la ciudad de Ayacucho y el ensayo experimental, en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) para lo cual se tomaron las medidas preventivas para que las probetas no se dañen durante el viaje. La preparación de las muestras y las mismas en estado endurecido se observa en las figuras 18 y 19. Las características de cada probeta se observan en la tabla 5.

Figura 17

SRD (de arriba hacia abajo) para las probetas PM1, para las probetas PM2 y para las probetas PM3.



Nota. Elaboración propia.

3.9.4.- Ensayo de las probetas a rotura con galgas extensiométricas

El proceso de experimentación de las probetas se ejecutó según el ASTM C469 para obtener el módulo de elasticidad. Se usaron strain gauges para registrar las deformaciones axiales y transversales. El punto control fue la zona central de la probeta como se muestra en la figura 20.

Figura 18

Elaboración de probetas de concreto.



Nota. Elaboración propia.

Figura 19

Probetas elaboradas para la experimentación.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5

Datos geométricos de las probetas elaboradas.

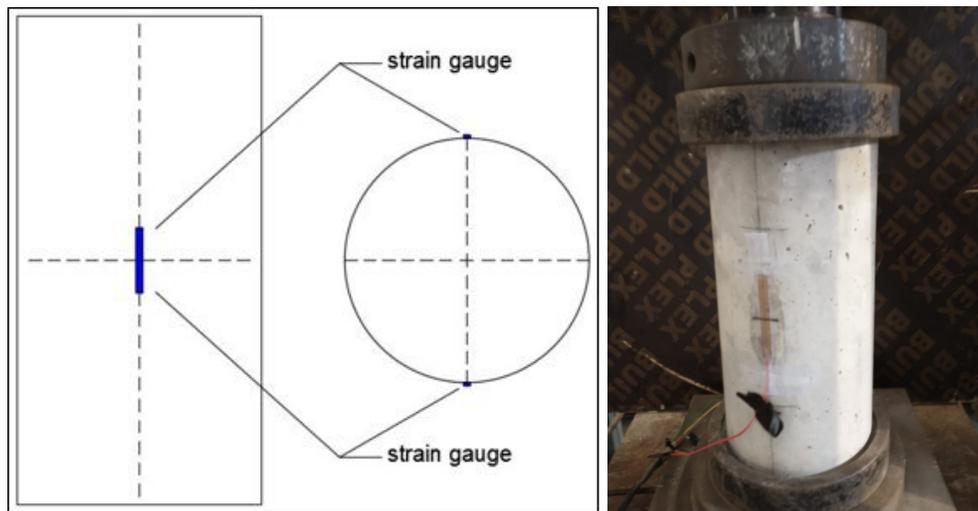
Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Capas de caucho (N)
PC-01	150.21	306.51	-
PC-02	151.11	306.48	-
PC-03	151.25	307.60	-
PM1-01	151.25	306.48	1
PM1-02	149.49	303.82	1
PM1-03	150.97	306.51	1
PM2-01	150.18	306.53	2
PM2-02	150.89	306.10	2
PM2-03	149.57	302.70	2
PM3-01	150.79	307.00	3
PM3-02	149.47	302.73	3
PM3-03	150.94	305.38	3

Elaboración propia.

La elección de la zona central como punto control se da puesto que es ahí donde los esfuerzos en la probeta son uniaxiales, mientras que en los extremos los esfuerzos son triaxiales.

Figura 20

Colocación del strain gauge en la probeta.



Nota. Elaboración propia.

Figura 21

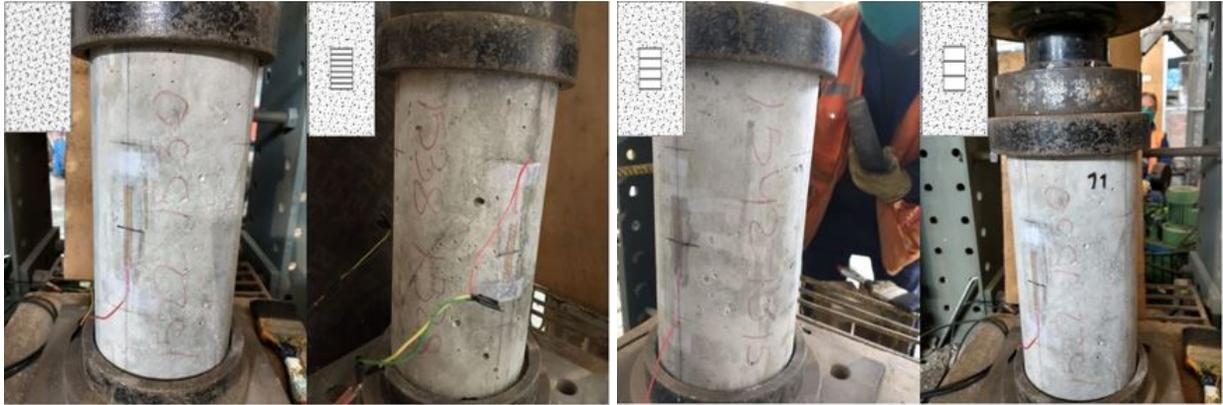
Equipo de ensayo de rotura con galgas extensiométricas.



Nota. Elaboración propia.

Figura 22

Cuatro tipos de especímenes de ensayo.



Nota. Elaboración propia.

3.9.5.- Ensayo experimental

3.9.5.1.- Rotura de probetas

En la tabla 6 se observa los resultados de resistencia máxima a compresión (f'_{c0}) con su correspondiente deformación unitaria axial (ϵ_{c0}) y en la figura 23 se aprecia las formas de falla de los distintos tipos de especímenes, en donde se observa diferencias claras entre los modos de rotura de las probetas del tipo PC respecto a las probetas modificadas. Se observa que las probetas del tipo PC llegaron a su punto de falla a través de fracturas en los lados; mientras que las probetas modificadas experimentaron fallas en compresión con desprendimiento del concreto que rodea a los SRD, dejando una columna de concreto adherida a las láminas de acero superior e inferior. Esto quiere decir que los SRD presentes en las probetas modificadas provocó una concentración de esfuerzos y por tanto del daño lo cual se confirma mediante análisis en elementos finitos en el programa Abaqus. También se demostró que las láminas de acero sirven como puntos de adherencia para asegurar una compatibilidad de deformaciones entre el concreto y el caucho reciclado.

Tabla 6

Resistencia pico y deformación axial asociada.

Probeta	f'c0 (kgf/cm2)	ϵ_{c0} (mm/m)
PC-01	378.903	2.16445840
PC-02	359.656	2.23900007
PC-03	348.957	2.62052091
PM1-01	307.685	2.81375010
PM1-02	291.713	1.74575005
PM1-03	300.641	1.96445839
PM2-01	308.678	2.31083340
PM2-02	317.555	2.20693757
PM2-03	317.956	2.90522925
PM3-01	304.631	1.65893755
PM3-02	336.419	2.03935423
PM3-03	291.120	2.38104174

Elaboración propia.

Figura 23

Falla de los especímenes: (a) PC, (b) PM1, (c) PM2 y (d) PM3.



(a)

Continuación



(b)



(c)



(d)

Nota. Elaboración propia.

3.9.5.2.- Resistencia a la compresión uniaxial

Las probetas modificadas experimentaron una reducción similar en sus resistencias a la compresión sin influencia de la cantidad de capas de caucho presentes en el SRD. En la tabla 7 se resume los resultados al respecto.

Tabla 7

Resistencia a la compresión de las probetas ensayadas: $f'c$

Probeta	$f'c$ (kgf/cm²)	Promedio	Desviación estándar (S)	% respecto a PC
PC-01	378.903	362.505	15.175	100.00 %
PC-02	359.656			
PC-03	348.957			
PM1-01	307.685	300.013	8.004	82.76 %
PM1-02	291.713			
PM1-03	300.641			
PM2-01	308.678	314.730	5.245	86.82 %
PM2-02	317.555			
PM2-03	317.956			
PM3-01	304.631	310.723	23.256	85.72 %
PM3-02	336.419			
PM3-03	291.120			

Elaboración propia.

3.9.5.3.- Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se obtuvo según el ASTM C469, en donde se indica la ecuación que se muestra a continuación.

$$E = (S_2 - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.000050)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad,

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última,

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 0.000050, y

ε_2 = Deformación unitaria longitudinal producido por S_2 .

Al igual que para la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad de las probetas modificadas decrece sin influencia de la cantidad de capas de caucho presente en el SRD. La tabla 8 muestra estos resultados.

Tabla 8

Módulo de elasticidad de las probetas ensayadas: E

Probeta	E (kgf/cm²)	Promedio	Desviación estándar (S)	% respecto a PC
PC-01	267140.782	228668.456	43506.936	100.00 %
PC-02	237410.206			
PC-03	181454.381			
PM1-01	190644.898	218405.122	25638.075	95.51 %
PM1-02	223378.026			
PM1-03	241192.442			
PM2-01	198872.523	205776.540	12415.027	89.99 %
PM2-02	220108.981			
PM2-03	198348.117			
PM3-01	213089.944	221105.880	10589.783	96.69 %
PM3-02	233110.852			
PM3-03	217116.844			

Elaboración propia.

3.9.6.- Análisis numérico en el programa Abaqus con inclusión de daño

Un ensayo simulado con inclusión de daño se realizó en el programa Abaqus. Esto permitió obtener datos que el ensayo experimental según ASTM C469, el cual es la normativa estándar para la obtención del módulo de elasticidad, no nos brinda. Este ensayo simulado con datos tomados del ensayo experimental permite registrar las deformaciones permanentes que sufre la probeta en cada instante de carga; así como el daño en tracción y compresión.

Para el modelamiento de las probetas se usó un contacto del tipo "General Contact" con características de contacto tangencial y normal rugosos, permitiendo la separación entre los materiales (caucho, concreto y acero) durante el proceso de carga. Se desarrolló un análisis del tipo "Explicit analysis" el cual toma en cuenta las propiedades inelásticas de los materiales y el daño que sufren en el proceso. Todos los especímenes fueron sometidos a un desplazamiento en la parte superior a una velocidad 0.125 mm/seg; esto quiere decir, un desplazamiento de 5.00 mm en 20 segundos. La base se consideró fija, sin rotaciones.

Las propiedades del concreto fueron las obtenidas según los ensayos experimentales y representando el daño por el modelo CDP explicado anteriormente. Las propiedades para el acero fueron netamente elásticas y para el caucho se usó el modelo de Yeoh para representar la hiperelasticidad. Las mediciones se registraron a mitad de altura de cada probeta como en el ensayo experimental.

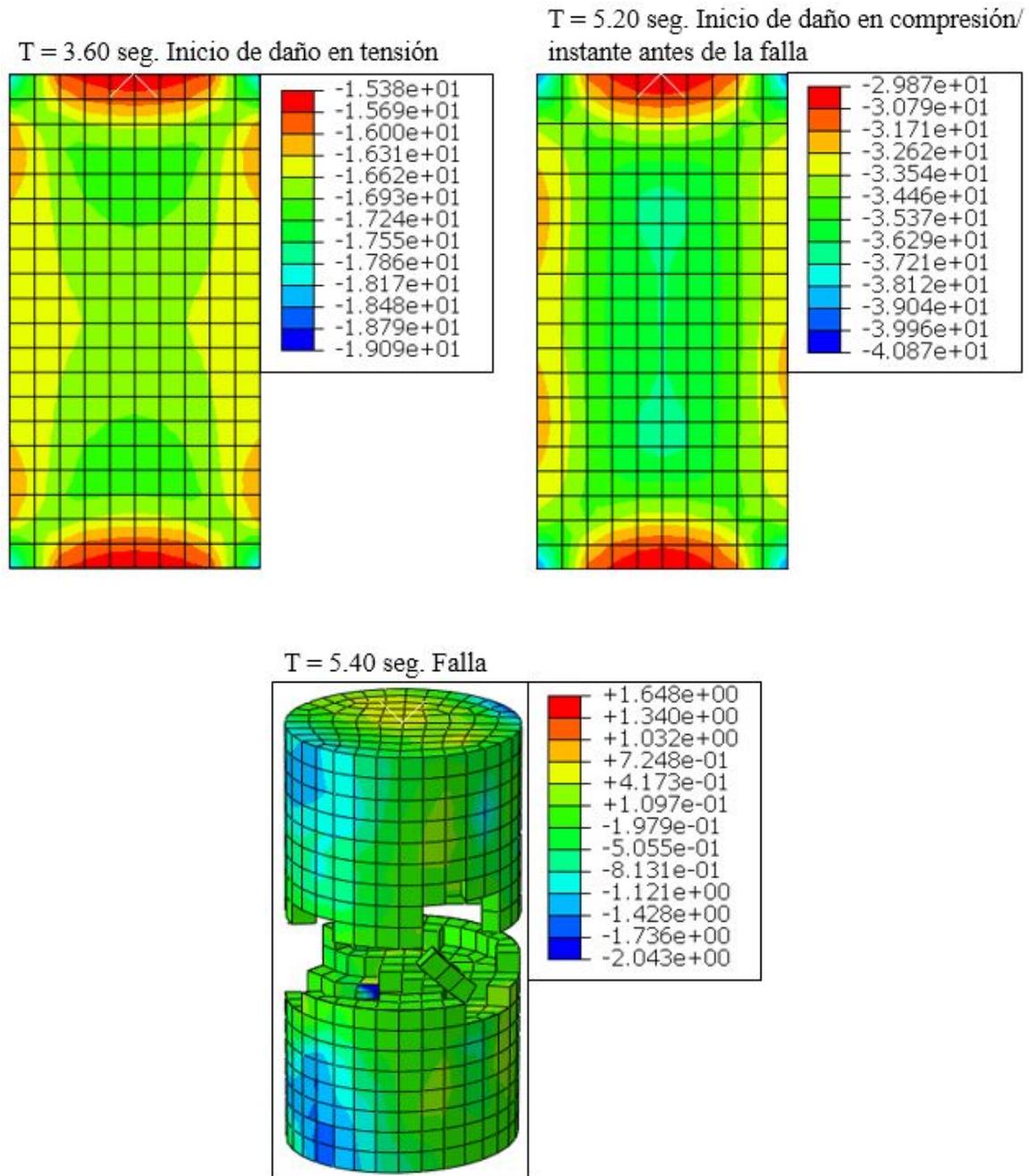
3.9.6.1.- Visualización de resultados en imágenes

Probeta Convencional: PC. Tiempo de ensayo: T = 5.40 seg.

Desarrollo de esfuerzos axiales, Mpa

Figura 24

Esfuerzos axiales.

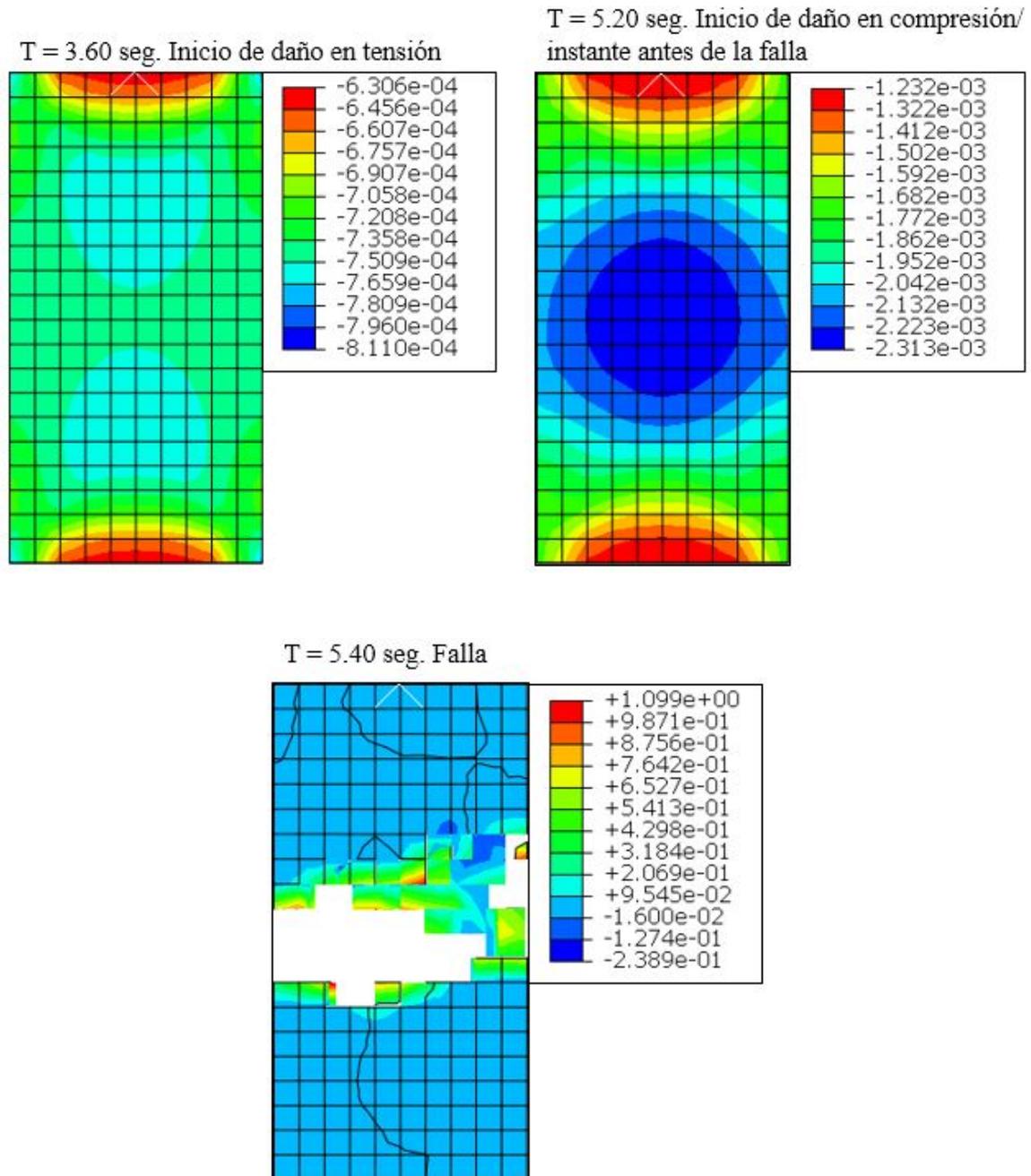


Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones axiales, mm/mm

Figura 25

Deformaciones axiales.

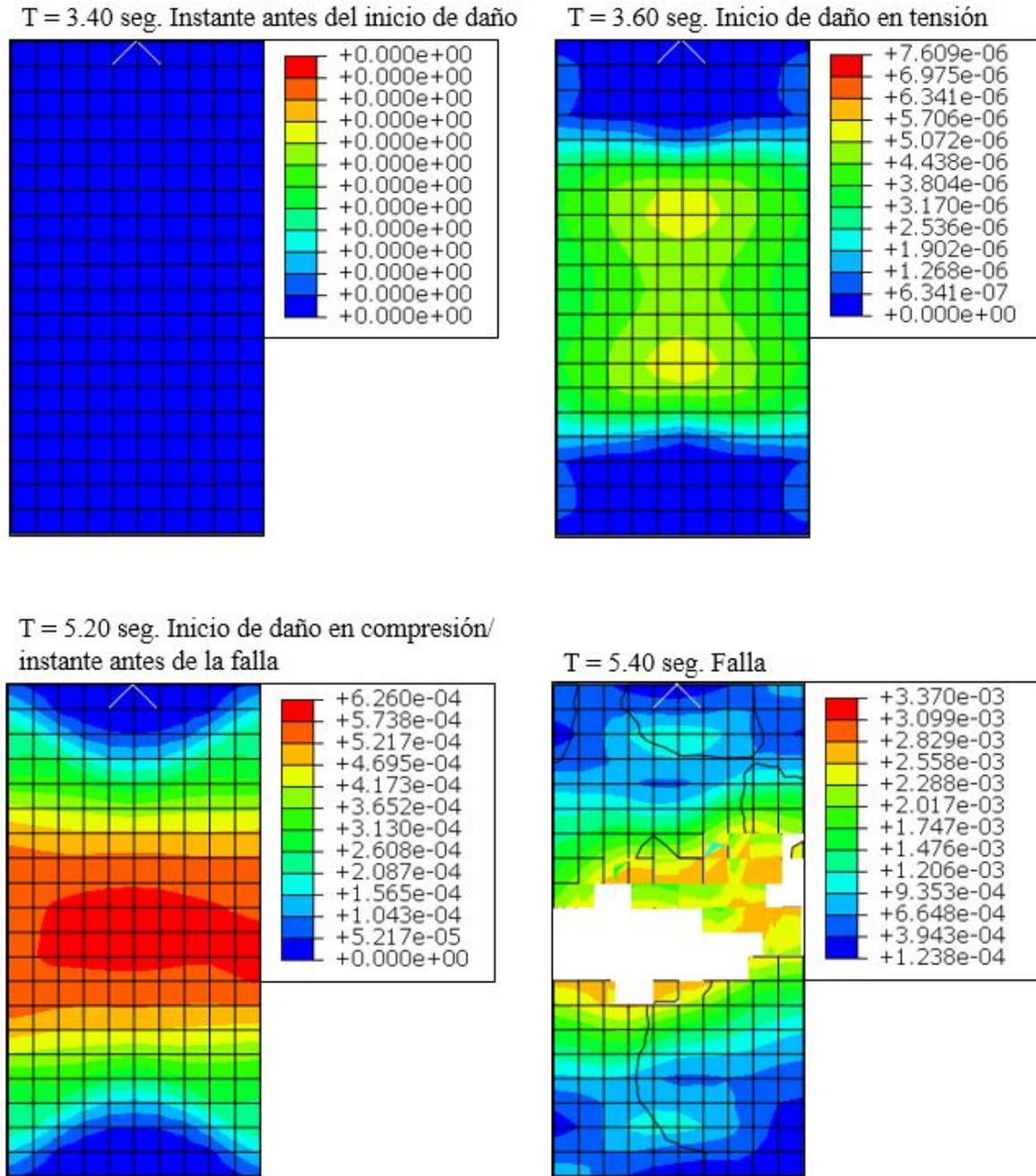


Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones plásticas, mm/mm

Figura 26

Deformaciones plásticas.

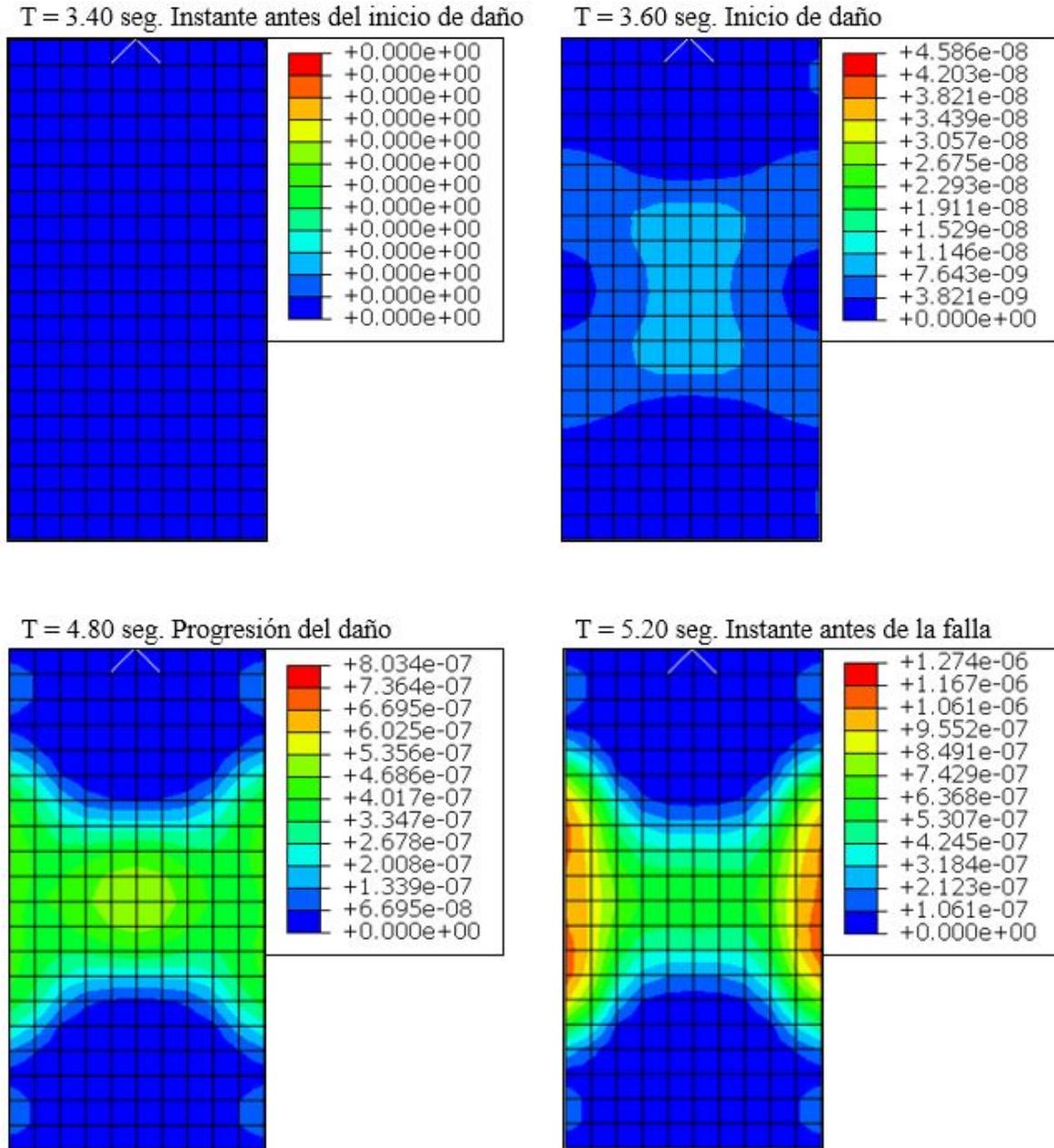


Nota. Elaboración propia.

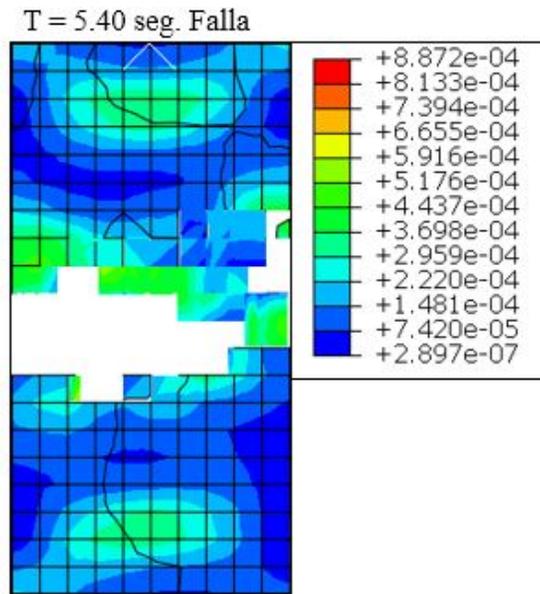
Desarrollo del daño en tensión

Figura 28

Daño en tensión.



Continuación



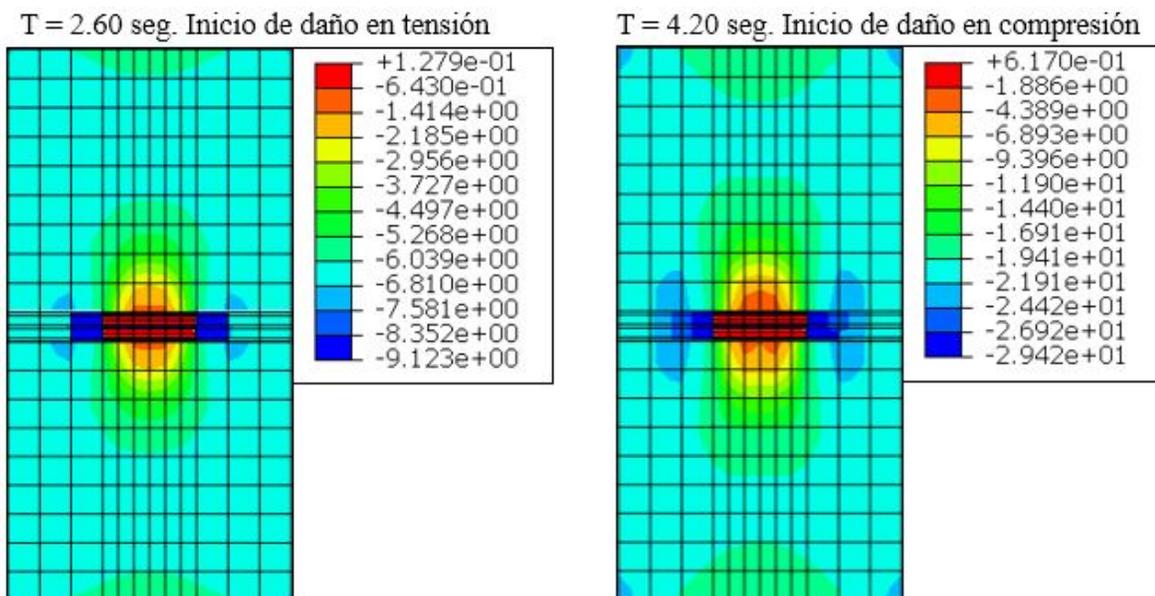
Nota. Elaboración propia.

Probeta Modificada: PM1. Tiempo de ensayo: T = 5.60 seg.

Desarrollo de esfuerzos axiales, Mpa

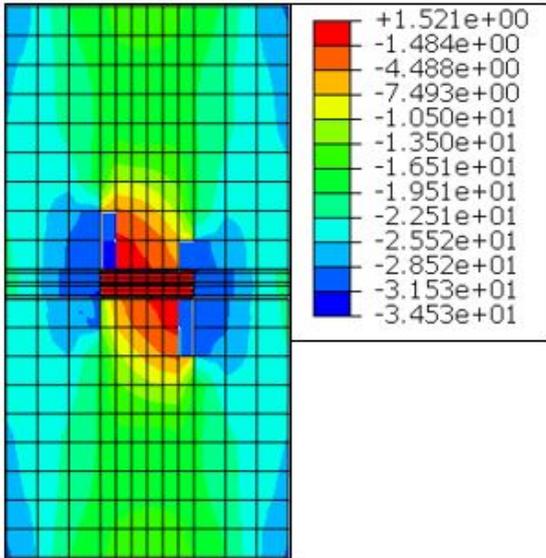
Figura 29

Esfuerzos axiales.

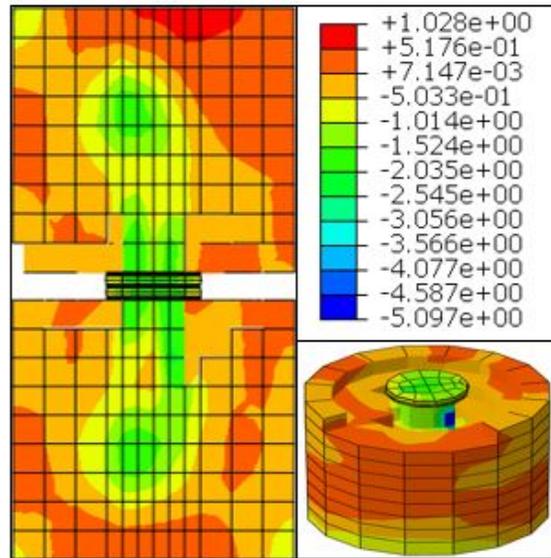


Continuación

T = 5.40 seg. Instante antes de la falla.



T = 5.60 seg. Falla



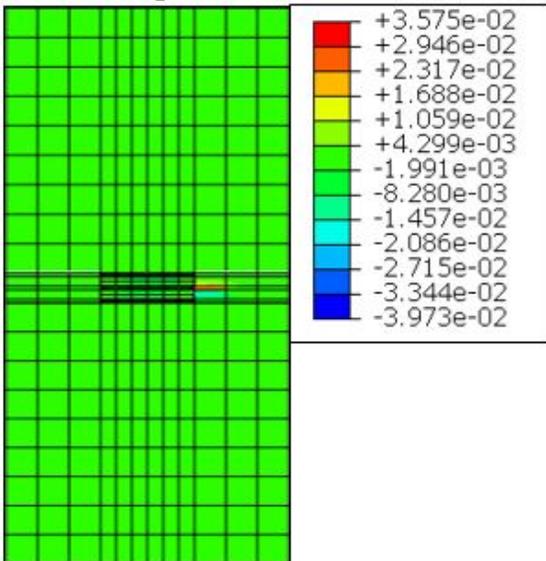
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones axiales, mm/mm

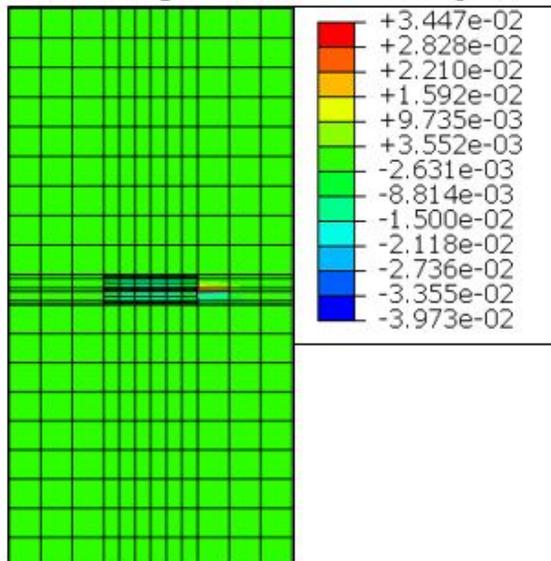
Figura 30

Deformaciones axiales.

T = 2.60 seg. Inicio de daño en tensión

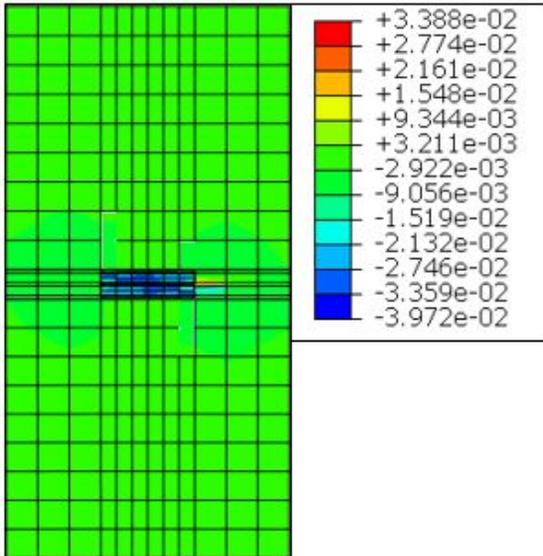


T = 4.20 seg. Inicio de daño en compresión

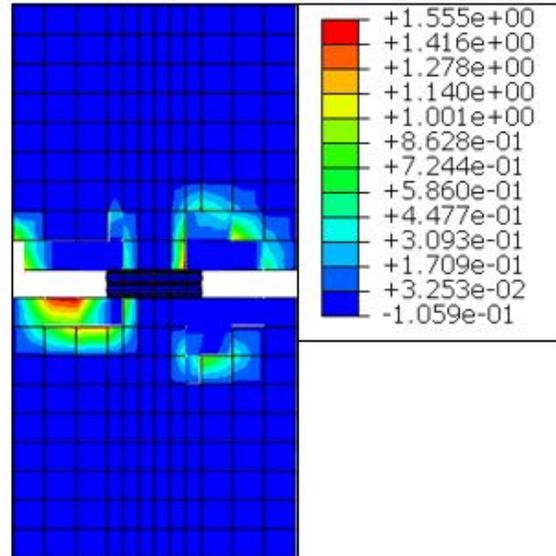


Continuación

T = 5.40 seg. Instante antes de la falla



T = 5.60 seg. Falla



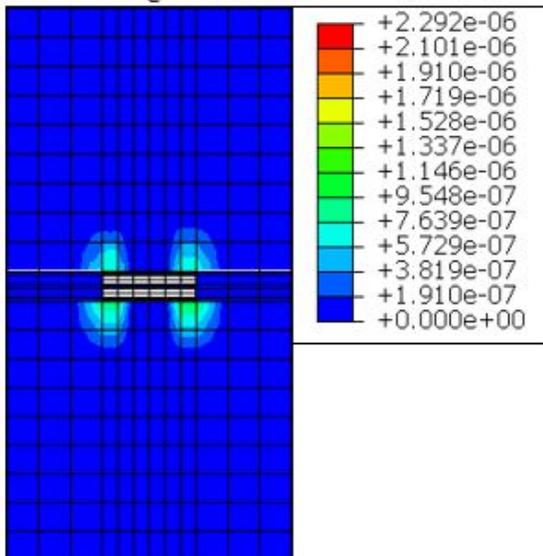
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones plásticas, mm/mm

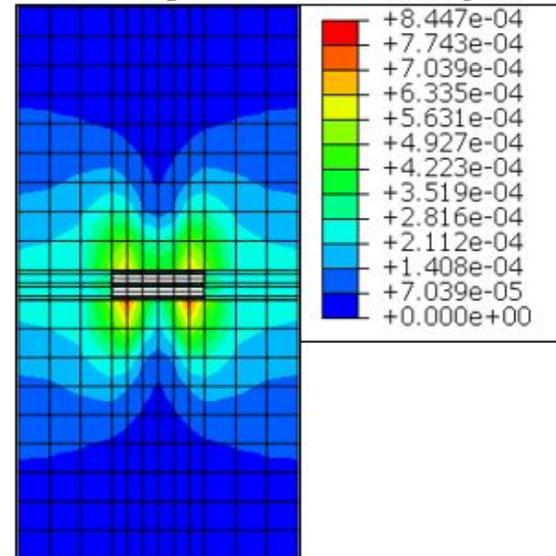
Figura 31

Deformaciones plásticas.

T = 2.60 seg. Inicio de taño en tensión

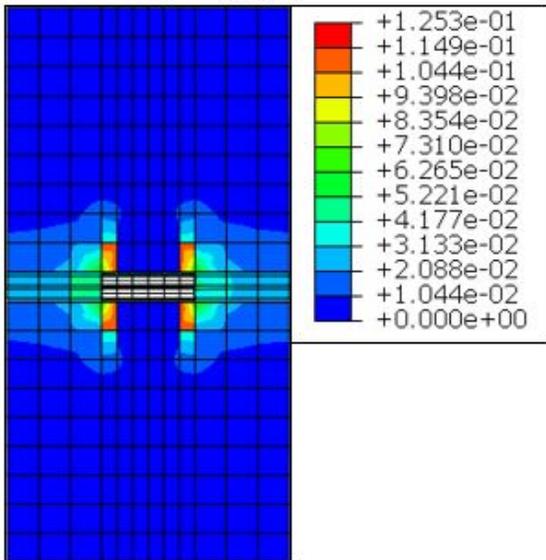


T = 4.20 seg. Inicio de daño en compresión

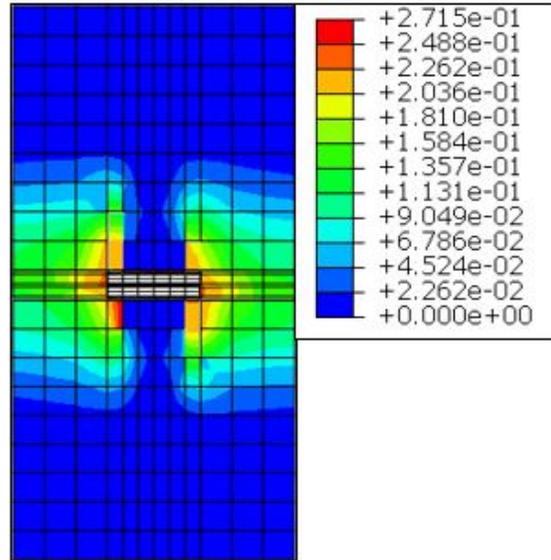


Continuación

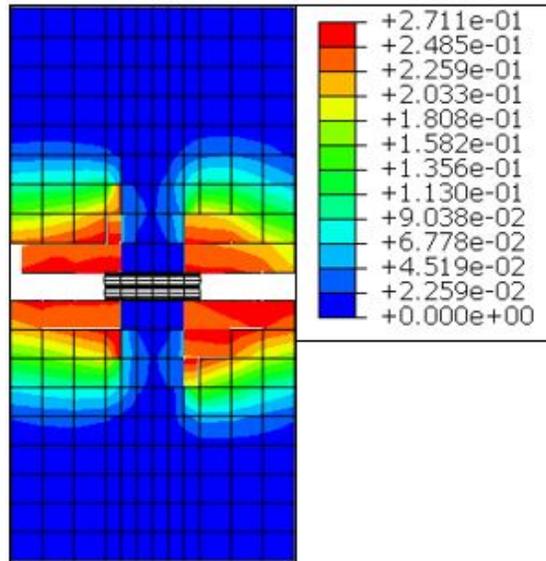
T = 5.00 seg. Propagación del daño



T = 5.40 Seg. Instante antes de la falla

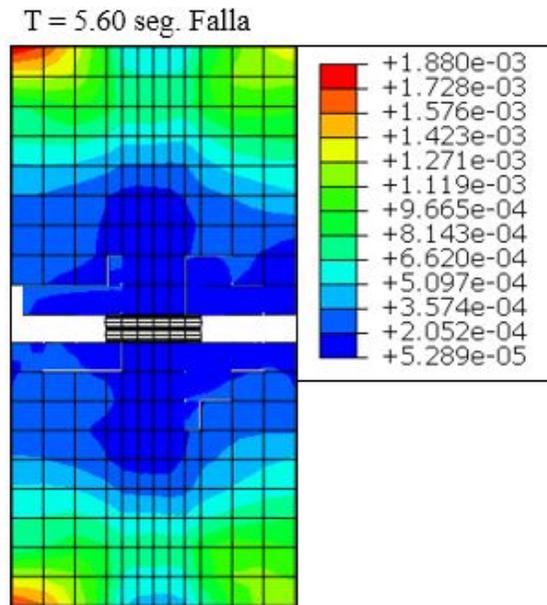


T = 5.60 segundos: Falla



Nota. Elaboración propia.

Continuación



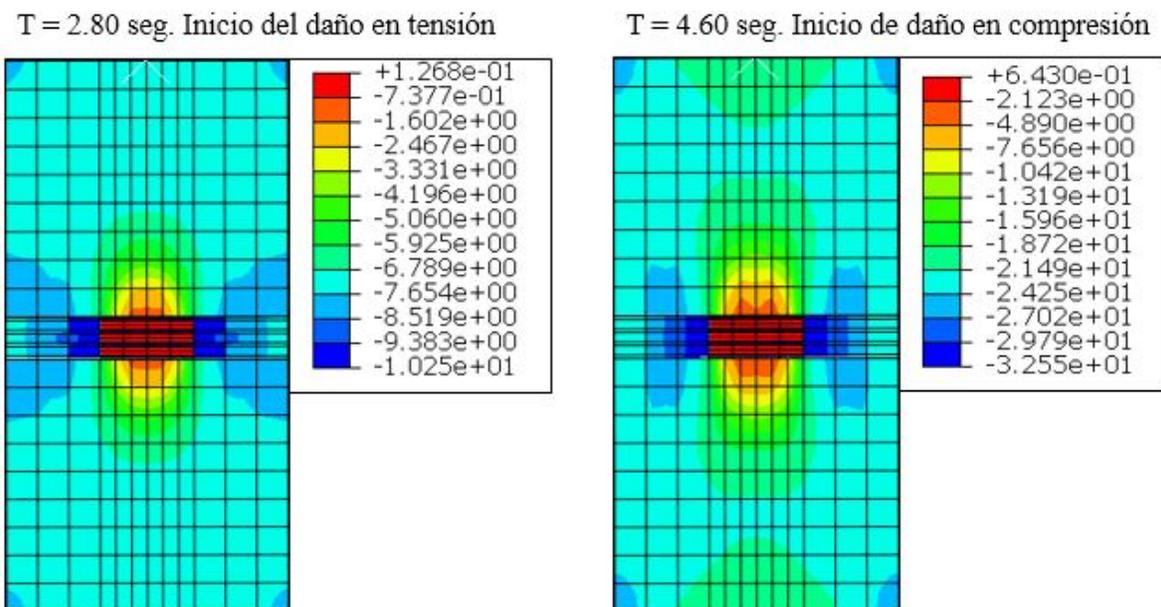
Nota. Elaboración propia.

Probeta Modificada: PM2. Tiempo de ensayo: T = 5.80 seg.

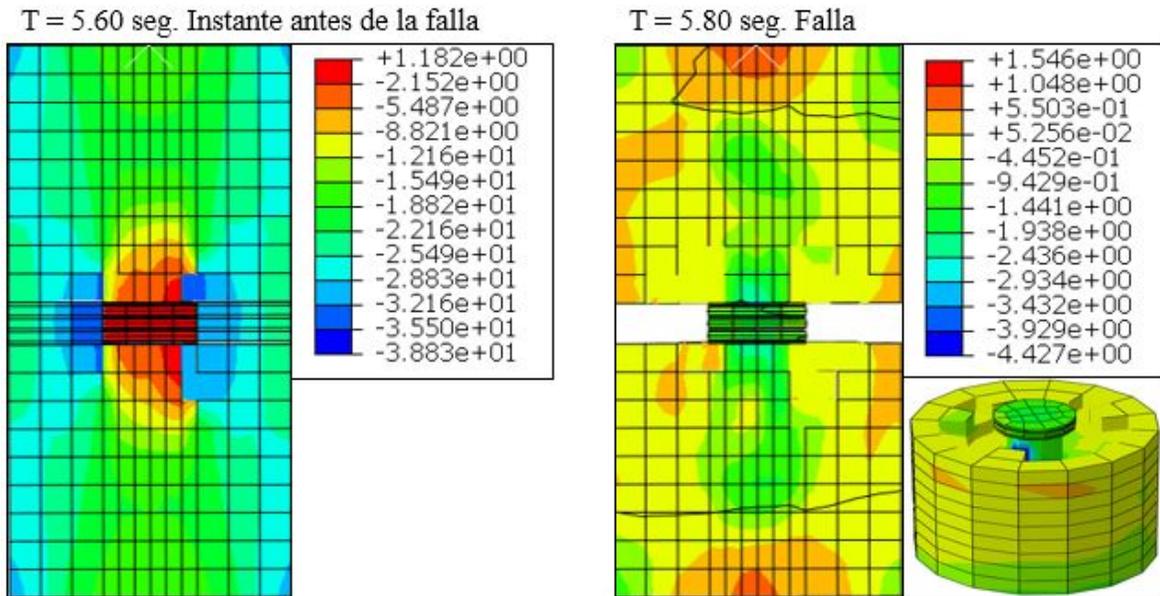
Desarrollo de esfuerzos axiales, Mpa

Figura 34

Esfuerzos axiales.



Continuación

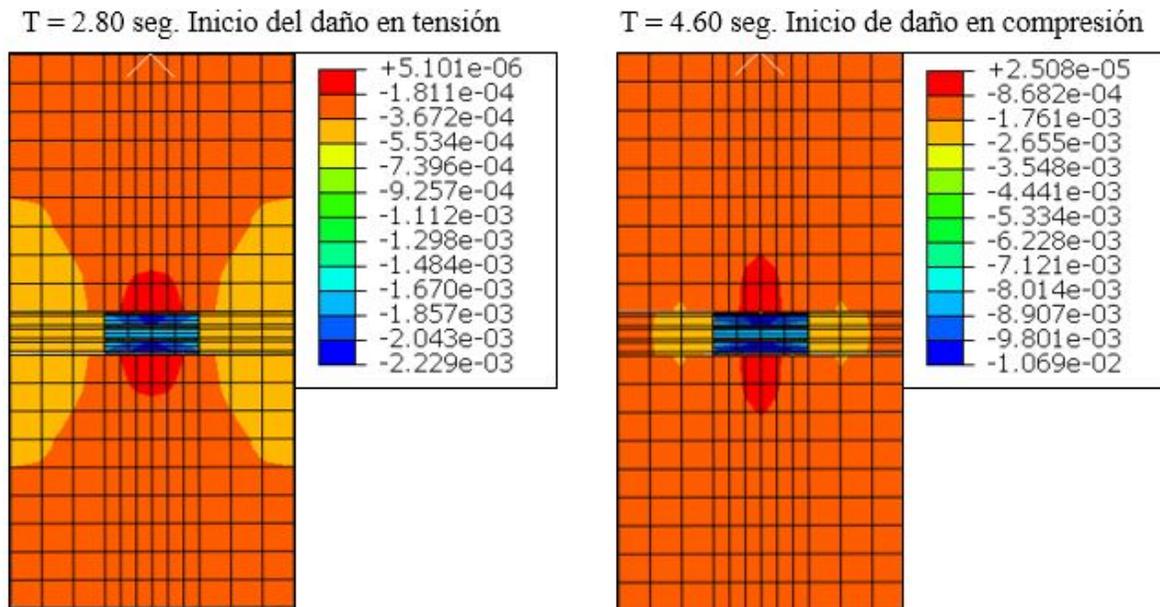


Nota. Elaboración propia.

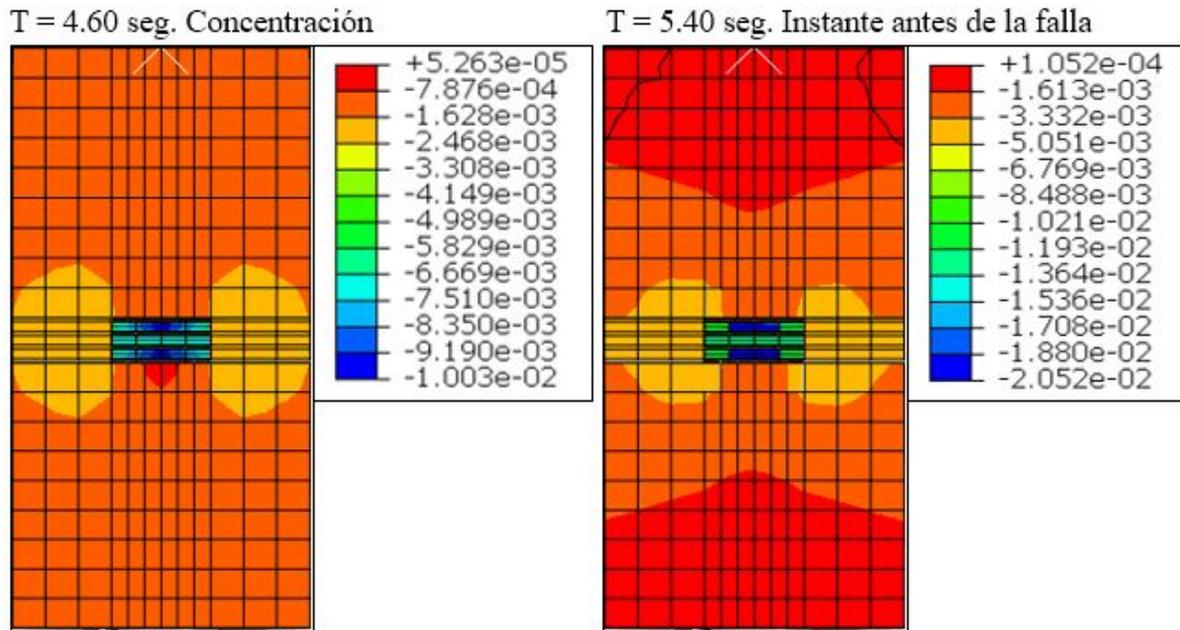
Desarrollo de deformaciones axiales, mm/mm

Figura 35

Deformaciones axiales.



Continuación

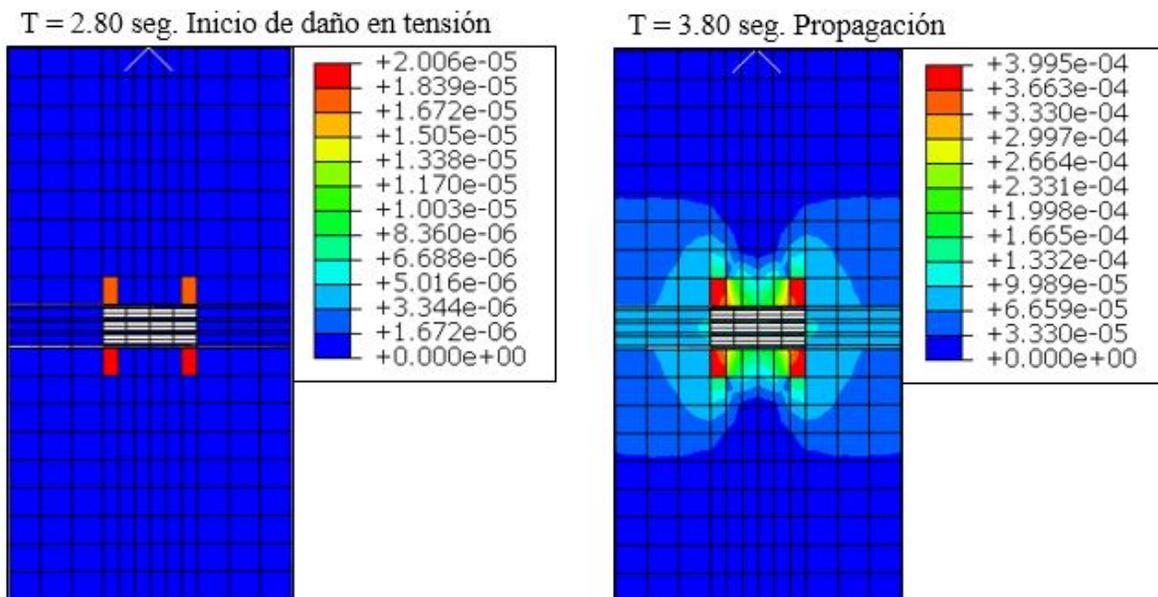


Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones plásticas, mm/mm

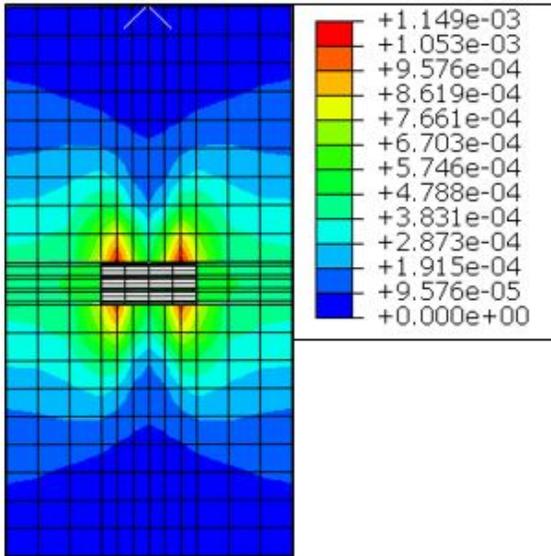
Figura 36

Deformaciones plásticas.

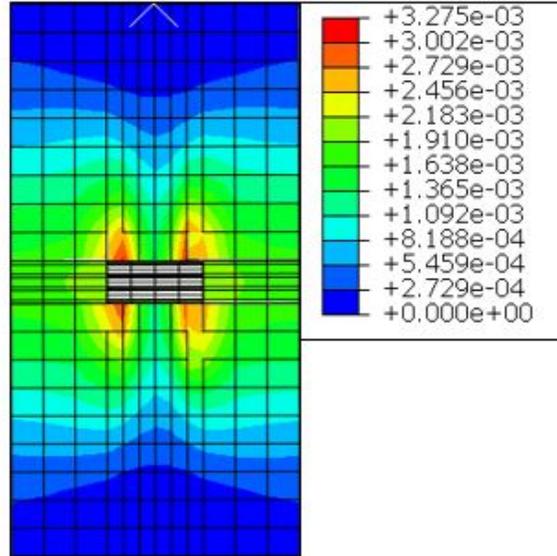


Continuación

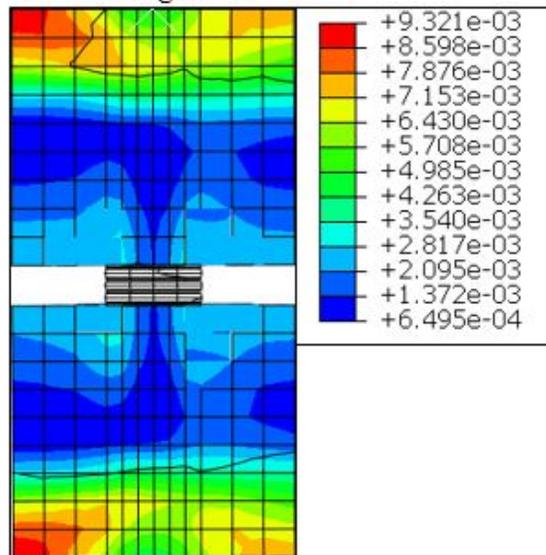
T = 4.60 seg. Inicio de daño en compresión



T = 5.60 seg. Instante antes de la falla



T = 5.80 seg. Falla



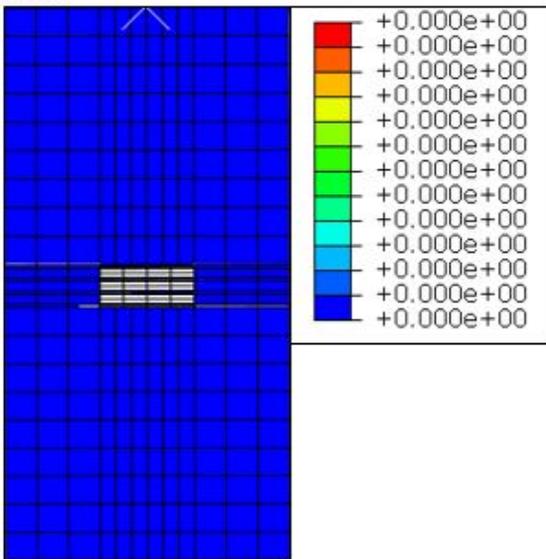
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo del daño en compresión

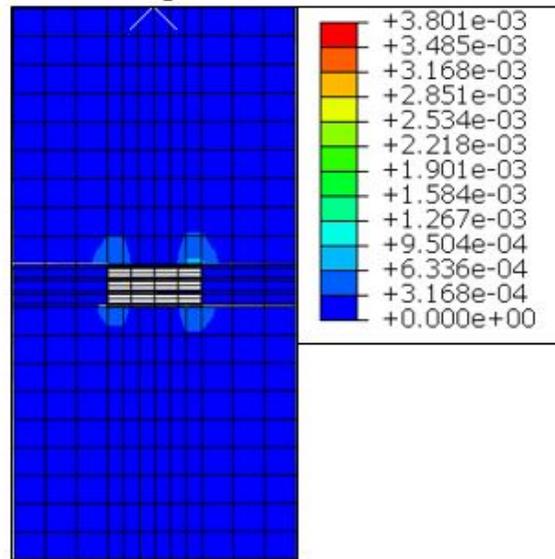
Figura 37

daño en compresión.

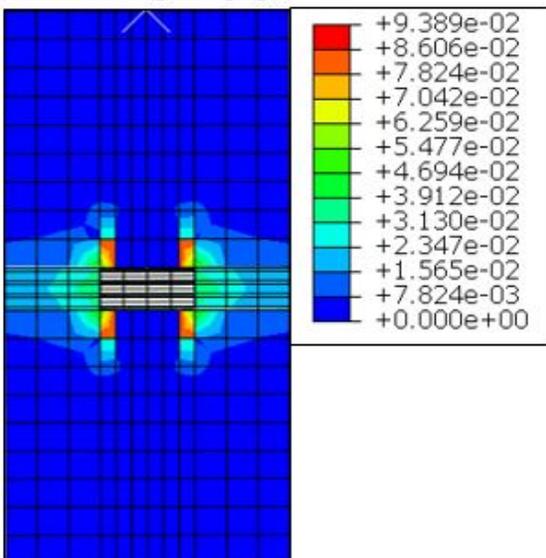
T = 4.40 seg. Instante antes del inicio de daño



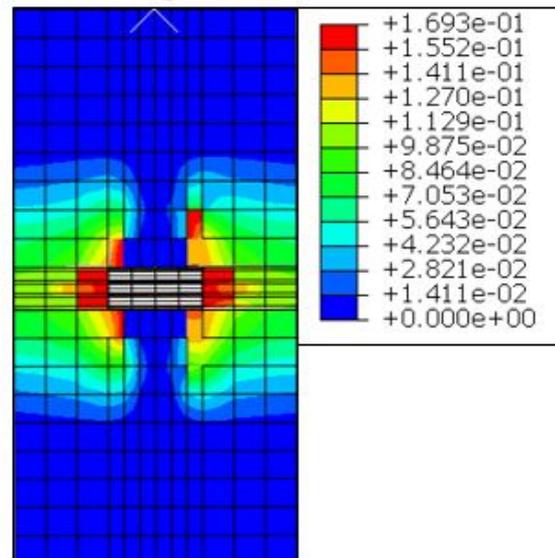
T = 4.60 seg. Inicio de daño



T = 5.20 seg. Propagación

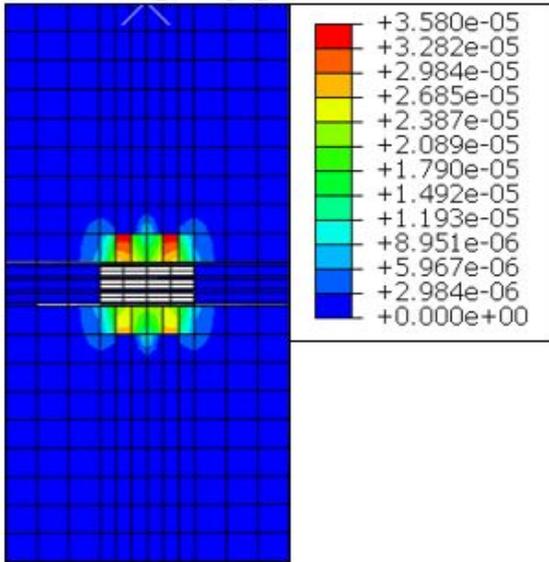


T = 5.60 seg. Instante antes de la falla

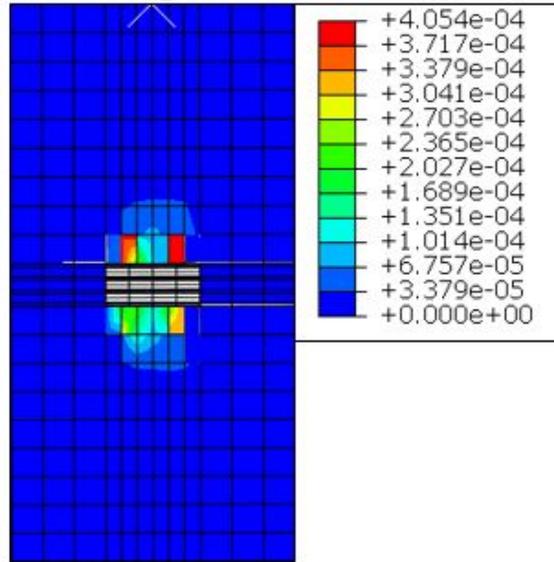


Continuación

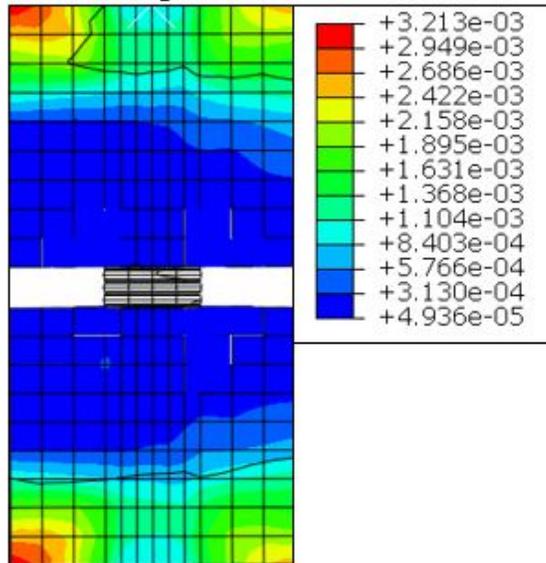
T = 3.80 seg. Propagación



T = 5.60 seg. Instante antes de la falla



T = 5.80 seg. Falla



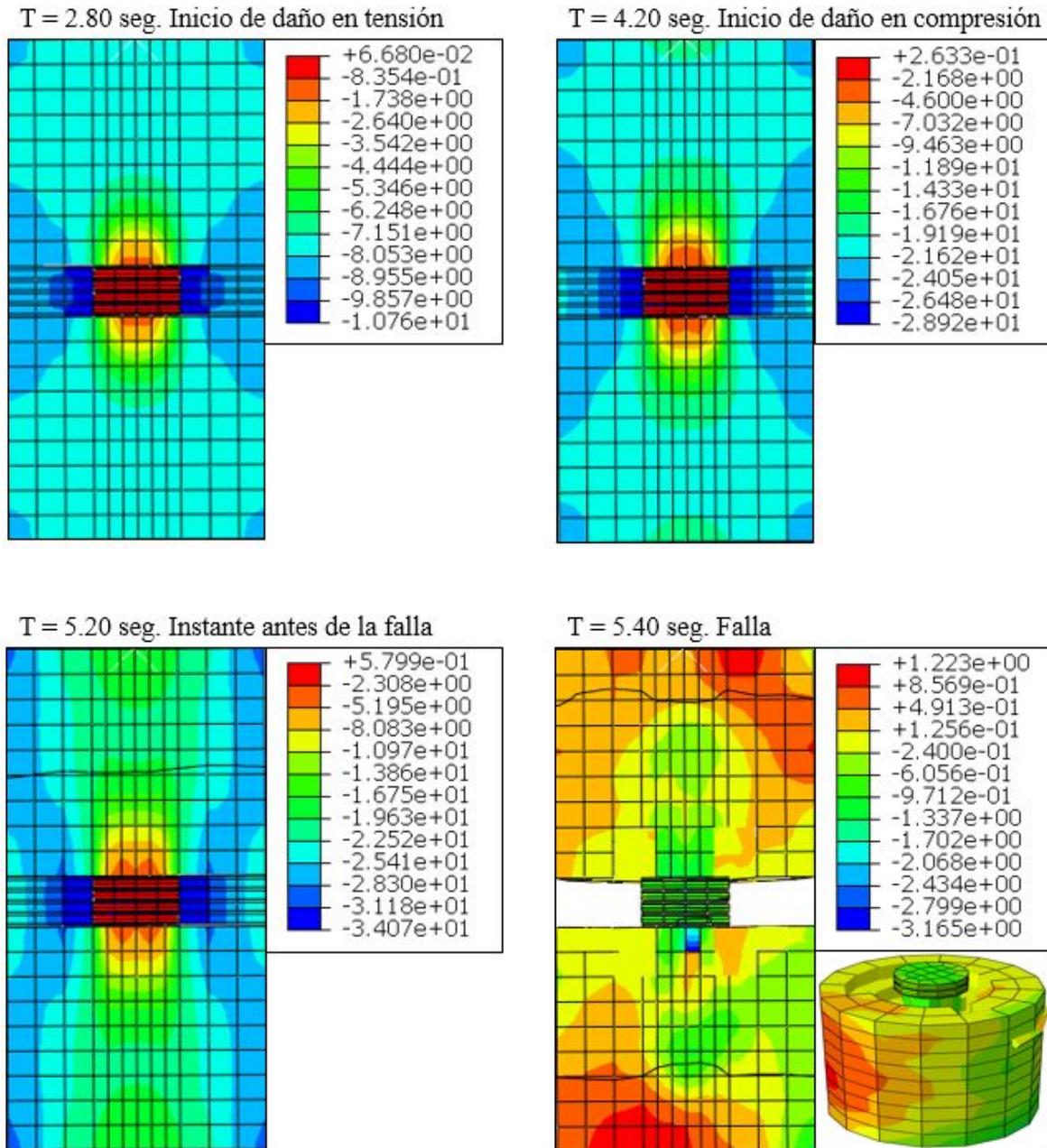
Nota. Elaboración propia.

Probeta Modificada: PM3. Tiempo de ensayo: $T = 5.40$ seg.

Desarrollo de esfuerzos axiales, Mpa

Figura 39

Esfuerzos axiales.

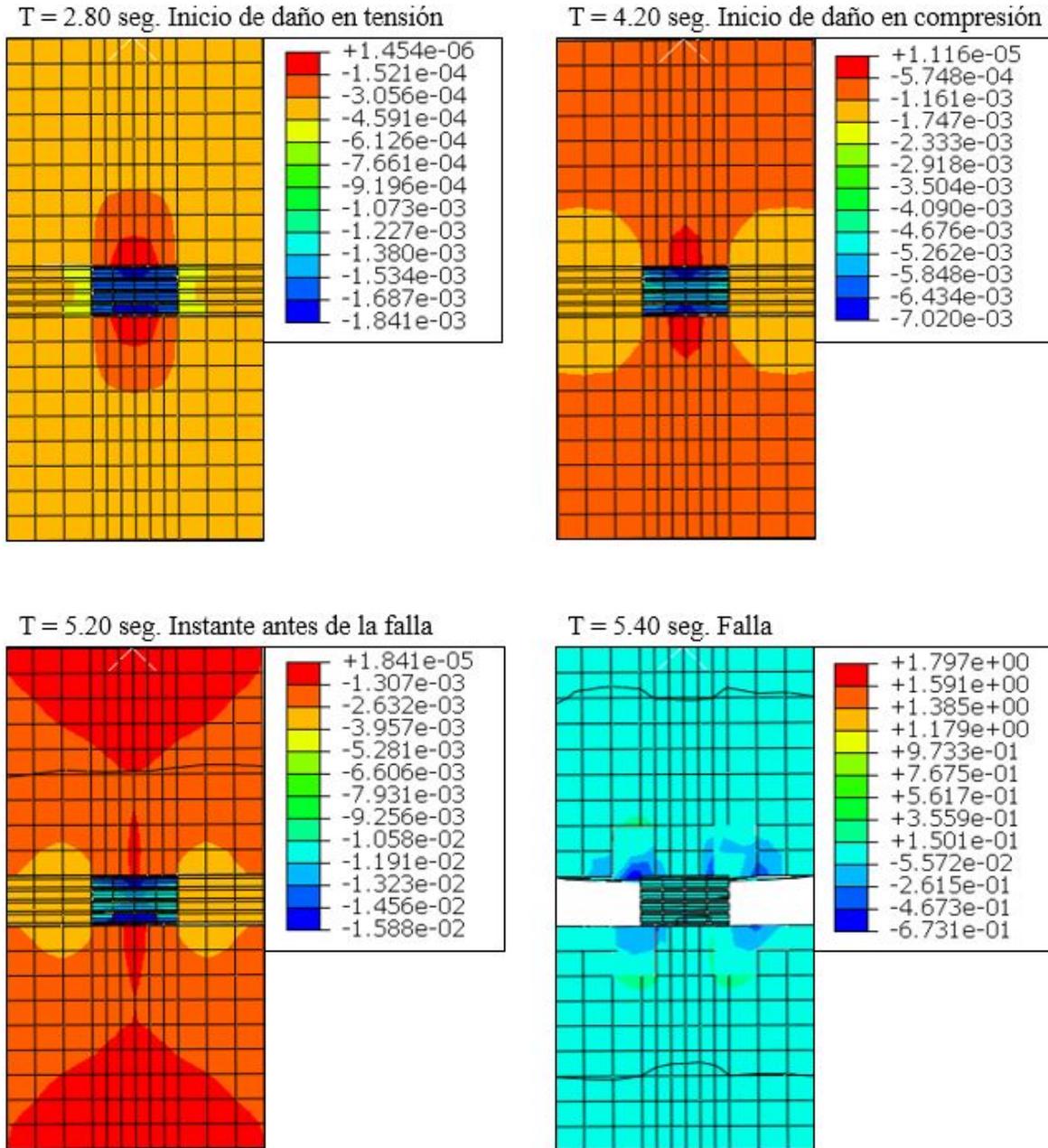


Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones axiales, mm/mm

Figura 40

Deformaciones axiales.



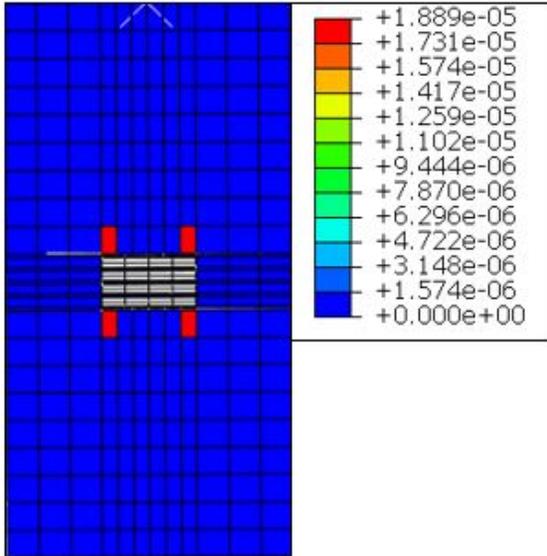
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de deformaciones plásticas, mm/mm

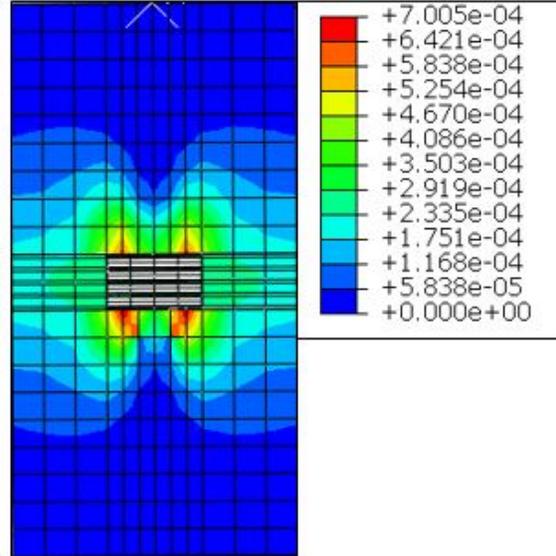
Figura 41

Deformaciones plásticas.

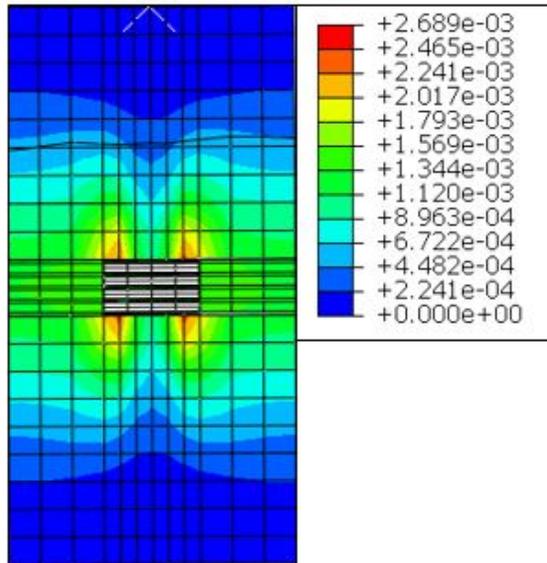
T = 2.80 seg. Inicio de daño en tensión



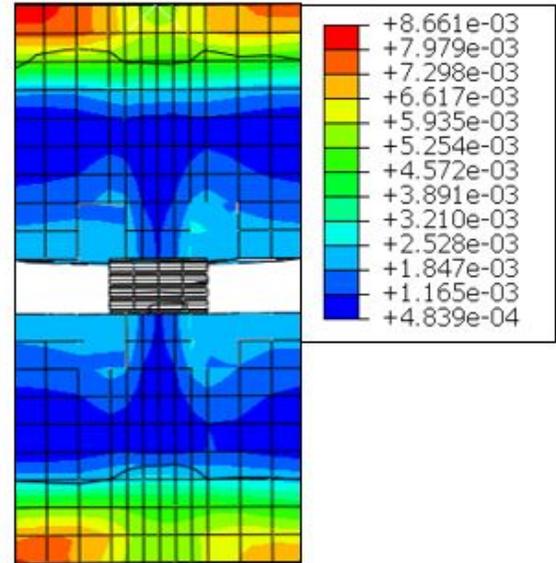
T = 4.20 seg. Inicio del daño en compresión



T = 5.20 Seg. Instante antes de la falla



T = 5.40 seg. Falla



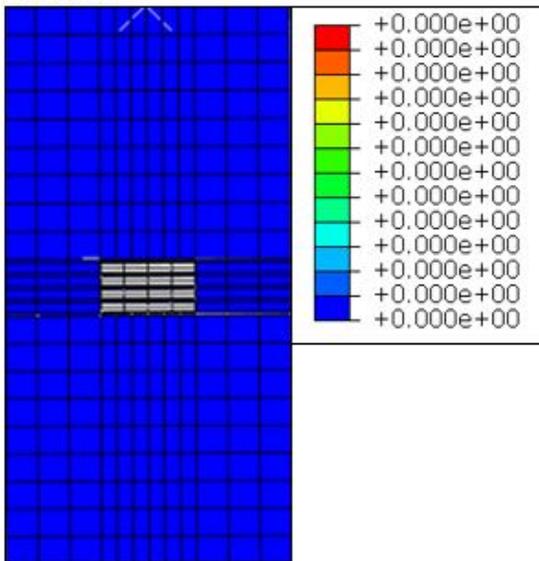
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo del daño en compresión

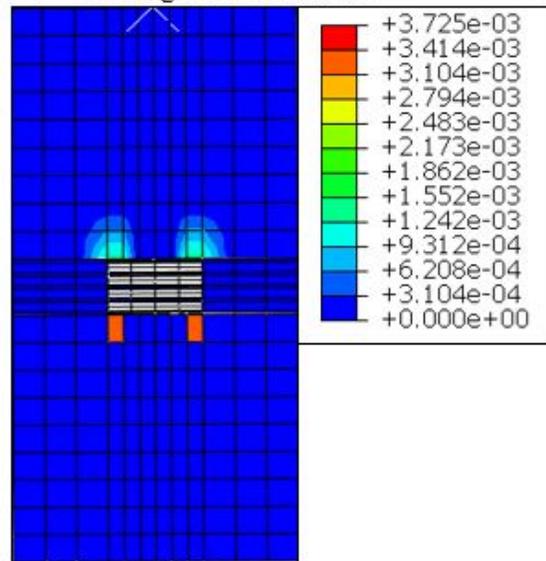
Figura 42

Daño en compresión.

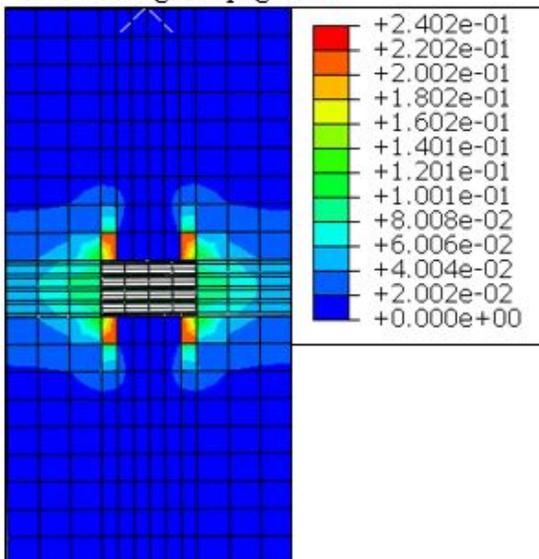
T = 4.00 seg. Instante antes del inicio de daño



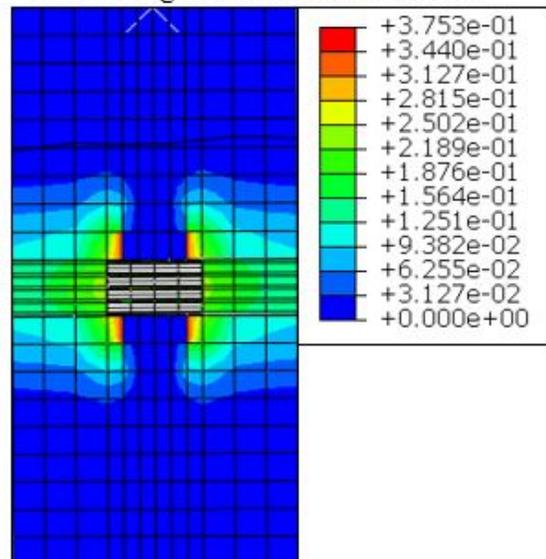
T = 4.20 seg. Inicio del daño



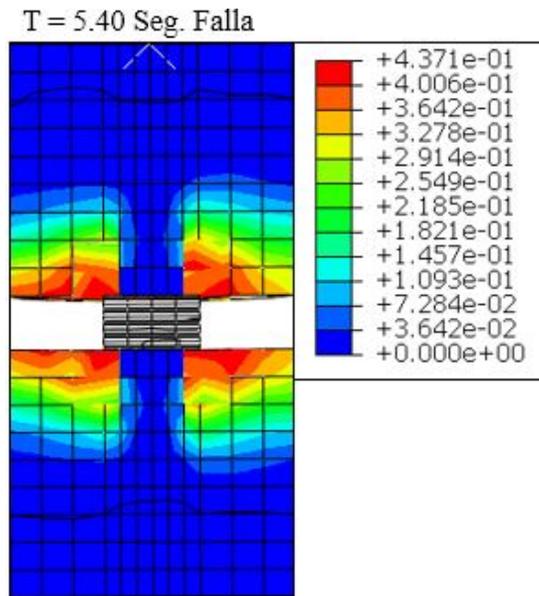
T = 5.00 seg. Propagación



T = 5.20 seg. Instante antes de la falla



Continuación



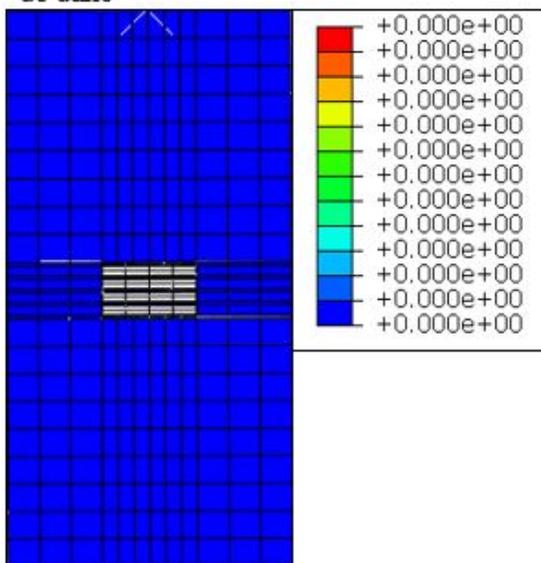
Nota. Elaboración propia.

Desarrollo del daño en tensión

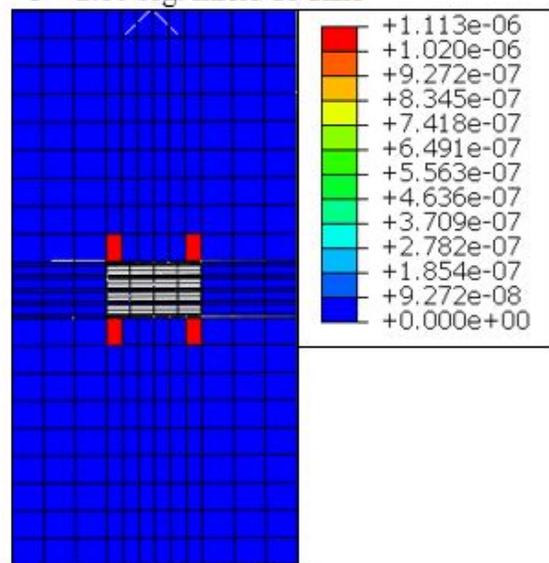
Figura 43

Daño en tensión.

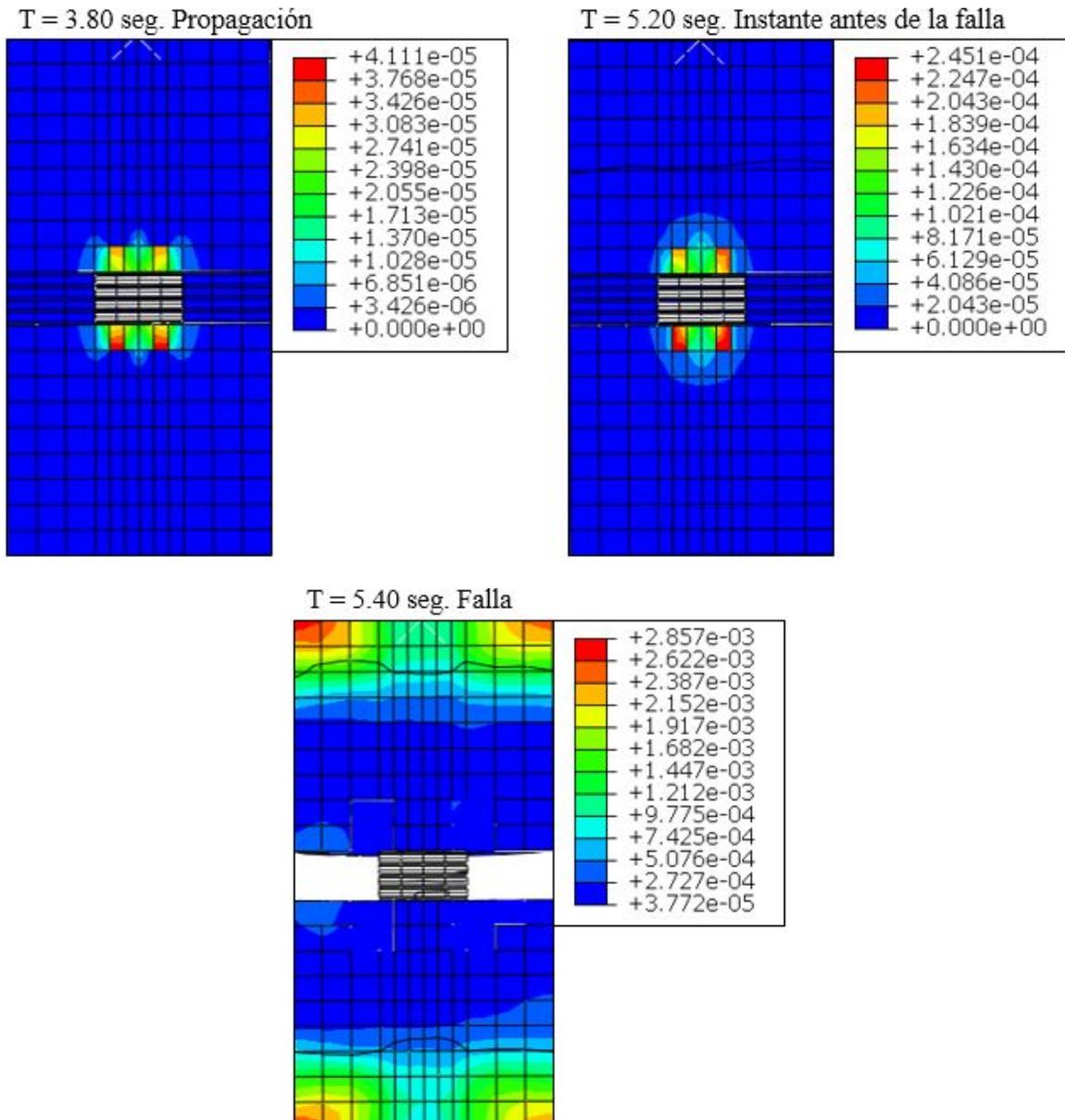
T = 2.60 seg. Instante antes del inicio de daño



T = 2.80 seg. Inicio de daño



Continuación



Nota. Elaboración propia.

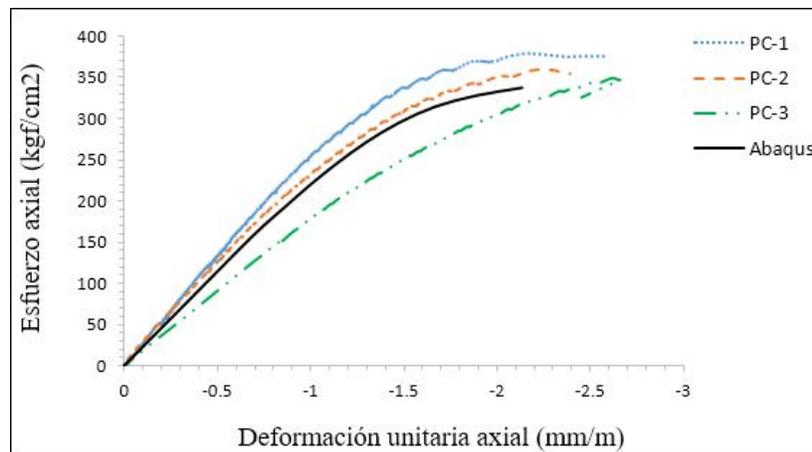
De las imágenes presentadas como resultado del análisis en el programa Abaqus, se obtienen formas de falla similares respecto a los ensayos experimentales. De las probetas modificadas, se observa una concentración tanto del daño, de los esfuerzos y las deformaciones, en la zona que rodea al SRD; esto se debe a una reducción de área resistente de concreto lo que genera despen-

dimiento en los lados de la probeta incluso un instante antes de que este llega a la falla, dejando solo una columna de concreto por encima y debajo del SRD, tal y como ocurre con los ensayos experimentales. Se observa que el comportamiento post-fluencia de las probetas modificadas es la que presenta los mayores cambios respecto a la probeta convencional. Con el daño en tensión y compresión siendo máximos a los lados del SRD y daño nulo en las zonas fuera de este. Esto hace que las deformaciones plásticas también se concentren en los lados alrededor del SRD con una mayor magnitud lo que le da a los especímenes modificados una mayor capacidad de absorber energía. Lo mencionado en este párrafo se observa con mayor claridad en el siguiente ítem.

3.9.6.2.- Visualización de resultados en gráficas

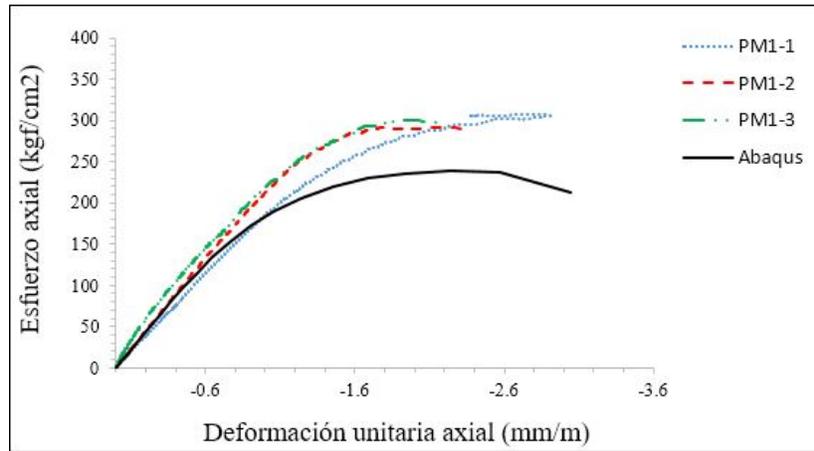
Figura 44

Gráfico esfuerzo-deformación axial: (a) PC, (b) PM1, (c) PM2 y (d) PM3.

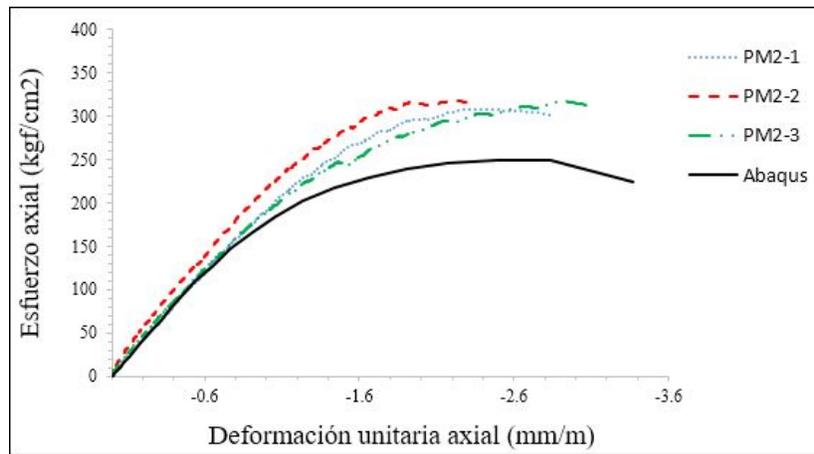


(a)

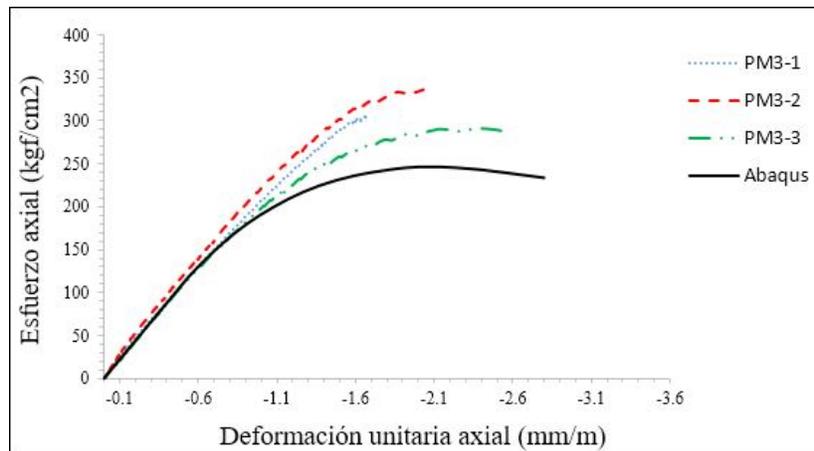
Continuación



(b)



(c)



(d)

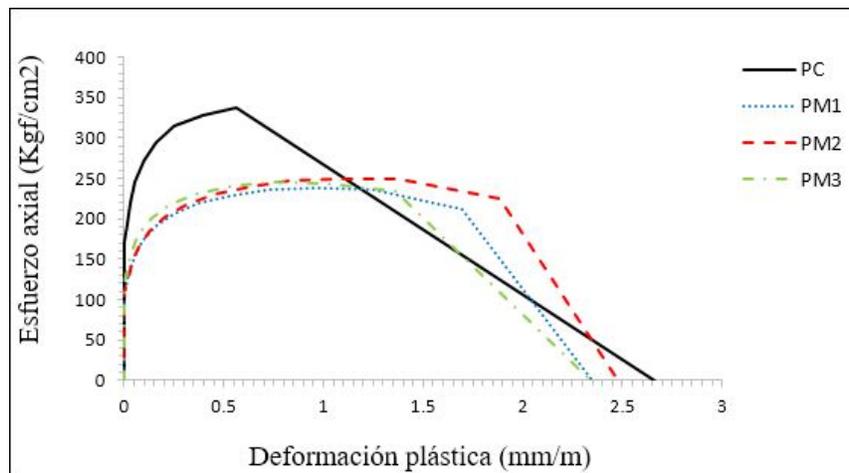
Nota. Elaboración propia.

En la figura 44 se puede ver que el programa Abaqus representa adecuadamente el comportamiento elástico de los especímenes con un mayor desplazamiento por un desarrollo progresivo del daño.

La figura 45 muestra las deformaciones permanentes que tendrían las probetas ensayadas para cada esfuerzo axial en el rango inelástico. Se puede concluir que las probetas modificadas, aunque tienen menor resistencia, tienen mayor capacidad de absorber energía ya que la fisuración se desarrolla de manera progresiva hasta llegar a la falla como se observa en la figura 46.

Figura 45

Gráfico esfuerzo-deformación plástica.



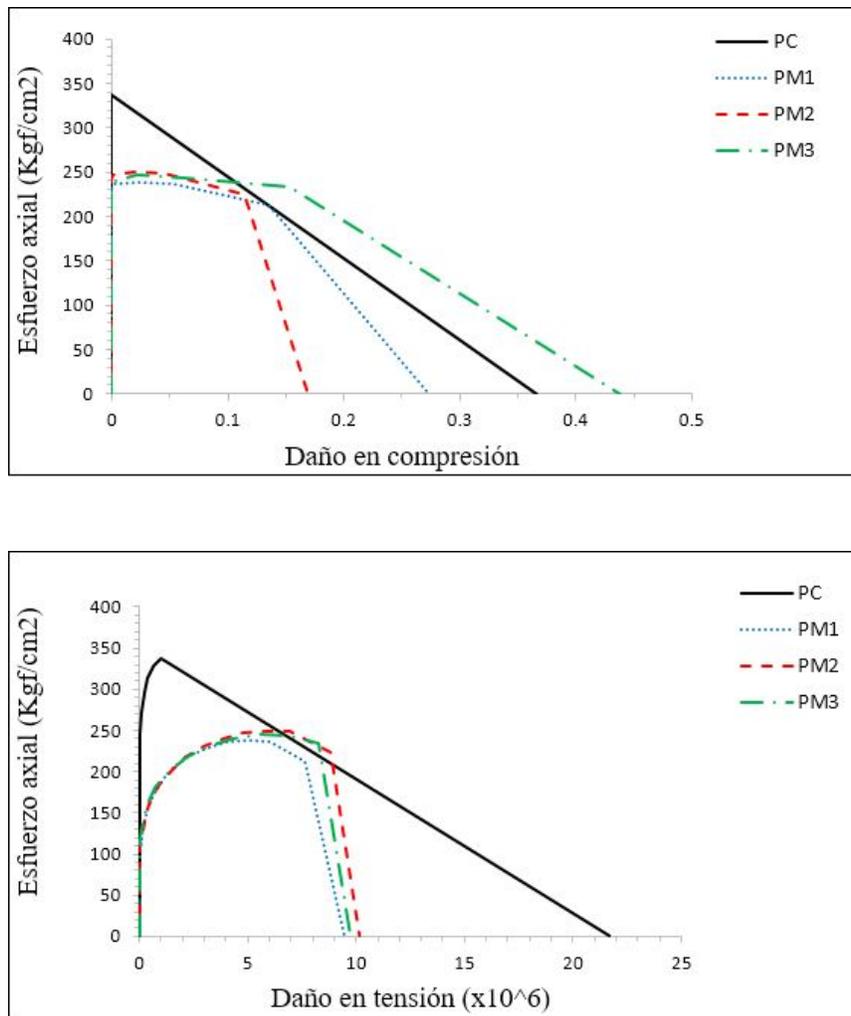
Nota. Elaboración propia.

La figura 46 muestra el desarrollo del daño por compresión y tensión para cada esfuerzo axial en donde se refleja lo ya mencionado; es decir, las probetas modificadas tienen mayor capacidad de absorber energía que la probeta convencional. El concreto desarrolla mayor fisuración antes de llegar a la falla. Este desarrollo de las fisuras se concentra justo en las zonas laterales al lado del SRD mientras que en el resto de la probeta disminuye o se anula completamente. Solo en

el instante de falla, el daño se expande a otras zonas del concreto (tal y como se vió en las imágenes del ítem 3.9.6.1) y que se representa por la línea recta al final de las gráficas hasta llegar a un esfuerzo cero. Lo contrario ocurre en la probeta convencional en donde se observa que las fisuras a compresión no aparecen hasta que la probeta alcanza el punto de falla, aunque con algunas fisuras por esfuerzos de tensión que le permiten disipar algo de energía.

Figura 46

Gráfico esfuerzo-daño en compresión y tensión



Nota. Elaboración propia.

3.9.7.- Ductilidad de los especímenes de ensayo

En la figura 47 se muestran las gráficas de esfuerzo-deformación de una curva idealizada bilineal a partir de las curvas experimentales. La curva idealizada se construyó de tal forma que el área por debajo es igual al área debajo de la curva aproximada, de tal manera que la energía (representado por el área debajo de una curva) no cambie.

Se observa que las ductilidades alcanzadas en los especímenes no sufren cambios importantes respecto de la ductilidad de la probeta convencional. En la tabla 9 se resumen las ductilidades calculadas.

Tabla 9

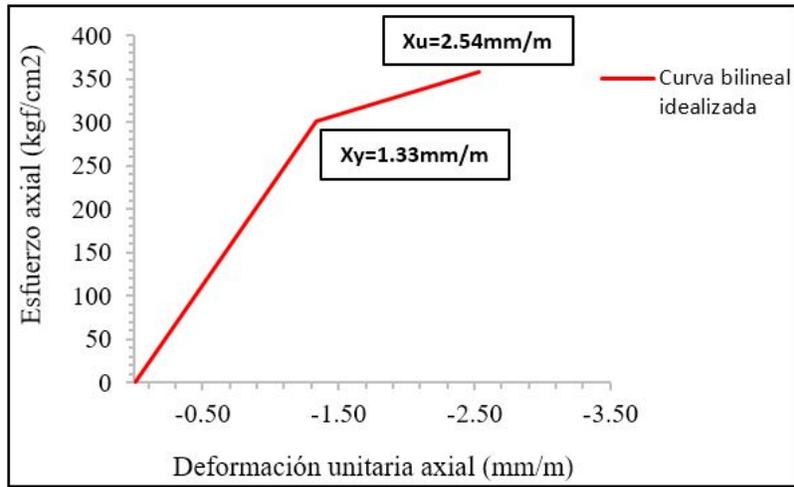
Ductilidad de cada espécimen: μ

Probeta	μ	Promedio	Desviación estándar (S)	% respecto a PC
PC-01	2.11	1.91	0.172	100.00 %
PC-02	1.81			
PC-03	1.82			
PM1-01	2.21	2.09	0.111	109.42 %
PM1-02	2.03			
PM1-03	2.01			
PM2-01	2.08	2.07	0.329	108.38 %
PM2-02	1.74			
PM2-03	2.39			
PM3-01	1.46	1.83	0.423	95.81 %
PM3-02	1.75			
PM3-03	2.30			

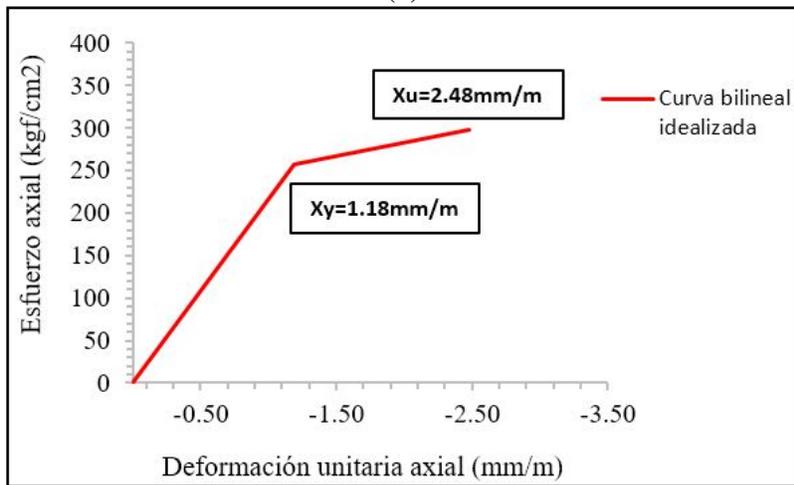
Elaboración propia.

Figura 47

Gráfico esfuerzo-deformación bilineal: (a) PC, (b) PM1, (c) PM2 y (d) PM3.



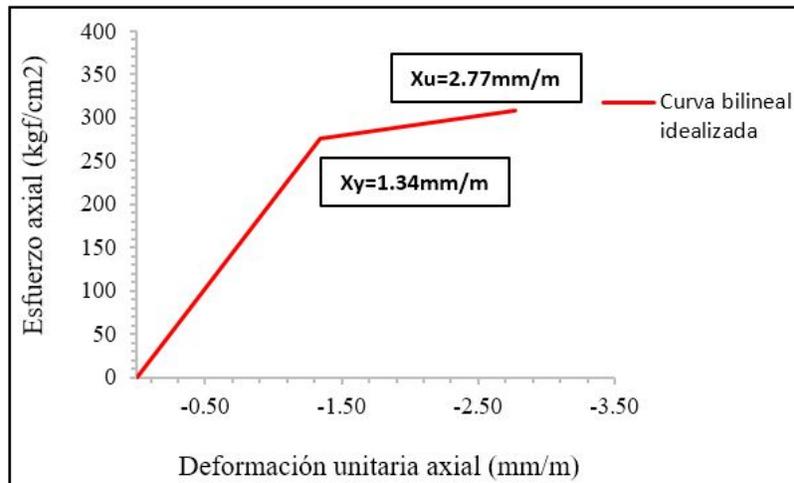
(a)



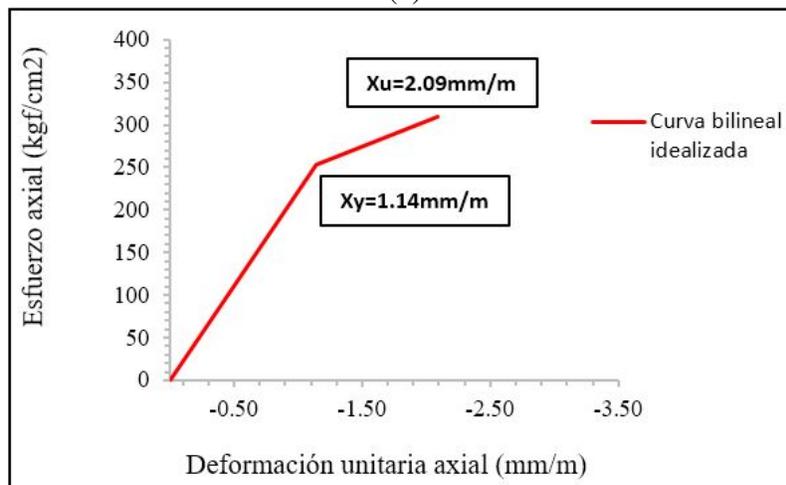
(b)

Cabe mencionar que la ductilidad de las probetas modificadas aumentan si se realiza un ensayo del tipo carga-descarga tal y como se vió en el análisis realizado por el programa Abaqus; contrario a lo que sucede en la probeta PC donde el comportamiento bajo un ensayo de carga-descarga resulta en una ductilidad muy similar al de un ensayo realizado en esta investigación según el ASTM C469 (el cual es para el cálculo del módulo de elasticidad).

Continuación



(c)



(d)

Nota. Elaboración propia.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1.- Contratación de hipótesis

Las hipótesis se contrastarán mediante el método de T-student para un muestra pequeña ($n = 3$). Se usará un nivel de significancia de 5 % para su uso en la tabla de distribución t-student el cual se incluye en los anexos.

Hipótesis 1. Si se incluye el SRD en la estructura del concreto, la resistencia a la compresión se reduce en un 10 %

De la tabla 7 se tiene que la resistencia a la compresión de la muestra PC es 362.505 kgf/cm². Por lo tanto $\mu = 326.255 \text{ kgf/cm}^2$ (10 % de la resistencia alcanzada por PC). A continuación se muestran los datos necesarios para la prueba de hipótesis y en la tabla 10, los resultados para las probetas modificadas.

$H_0 = \mu > 326.255$, hipótesis nula

$H_1 = \mu < 326.255$, hipótesis alternativa

$NC = 95 \%$, nivel de confianza

$NS = 5 \%$, nivel de significancia

$GL = n - 1 = 2$, grados de libertad

Tabla 10

Valores T-student para los resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes modificados

Especimen	n	\bar{X}	S	t
PM1	3	300.013	8.004	-5.65
PM2	3	314.730	5.245	-3.81
PM3	3	310.723	23.256	-1.16

Elaboración propia.

Donde:

n = tamaño muestral por cada tipo de espécimen

\bar{X} = media muestral

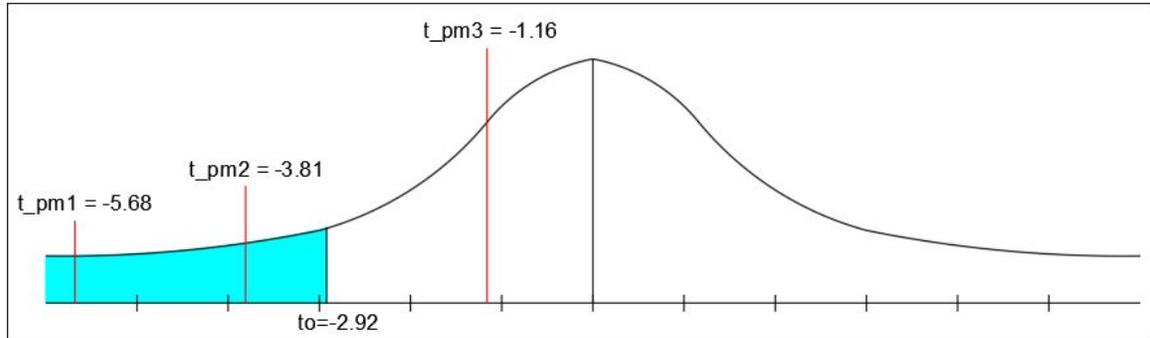
S = desviación estándar

De la tabla de distribución t-student para un $GL=2$ y nivel de significancia de 5 % se obtiene

$$t_0 = 2.92$$

Figura 48

Distribución T-student para los resultados de la resistencia a la compresión



Nota. Elaboración propia.

Hipótesis 2. Si se incluye el SRD en la estructura del concreto, el módulo de elasticidad se reduce en un 10 %

De la tabla 8 se tiene que el módulo de elasticidad de la muestra PC es 228668.456 kgf/cm². Por lo tanto $\mu = 205801.6104 \text{ kgf/cm}^2$ (10 % del módulo de elasticidad alcanzada por PC). A continuación se muestran los datos necesarios para la prueba de hipótesis y en la tabla 11, los resultados para las probetas modificadas.

$H_0 = \mu > 205801.6104$, hipótesis nula

$H_1 = \mu < 205801.6104$, hipótesis alternativa

$NC = 95 \%$, nivel de confianza

$NS = 5 \%$, nivel de significancia

$GL = n - 1 = 2$, grados de libertad

Tabla 11

Valores T-student para los resultados del módulo de elasticidad de los especímenes modificados

Especímen	n	\bar{X}	S	t
PM1	3	218405.122	25638.075	0.852
PM2	3	205776.540	12415.027	-0.003
PM3	3	221105.880	10589.783	2.503

Elaboración propia.

Donde:

n = tamaño muestral por cada tipo de espécimen

\bar{X} = media muestral

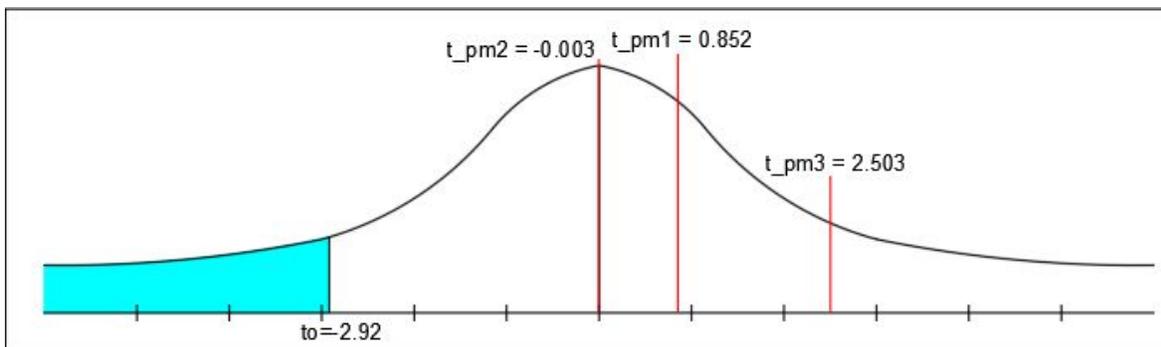
S = desviación estándar

De la tabla de distribución t-student para un GL=2 y nivel de significancia de 5 % se obtiene

$$t_0 = 2.92$$

Figura 49

Distribución T-student para los resultados del módulo de elasticidad



Nota. Elaboración propia.

Hipótesis 3. Al incluir el SRD, las probetas modificadas alcanzan ductilidades 50 % mayores a la probeta convencional

De la tabla 9 se tiene que la ductilidad de la muestra PC es 1.91. Por lo tanto $\mu = 2.865$ (150 % de la ductilidad alcanzada por PC). A continuación se muestran los datos necesarios para la prueba de hipótesis y en la tabla 12, los resultados para las probetas modificadas.

$H_0 = \mu > 2.865$, hipótesis nula

$H_1 = \mu < 2.865$, hipótesis alternativa

$NC = 95 \%$, nivel de confianza

$NS = 5 \%$, nivel de significancia

$GL = n - 1 = 2$, grados de libertad

Tabla 12

Valores T-student para los resultados de la ductilidad de los especímenes modificados

Especímen	n	\bar{X}	S	t
PM1	3	2.09	0.111	-12.093
PM2	3	2.07	0.329	-4.185
PM3	3	1.83	0.423	-4.238

Elaboración propia.

Donde:

n = tamaño muestral por cada tipo de espécimen

\bar{X} = media muestral

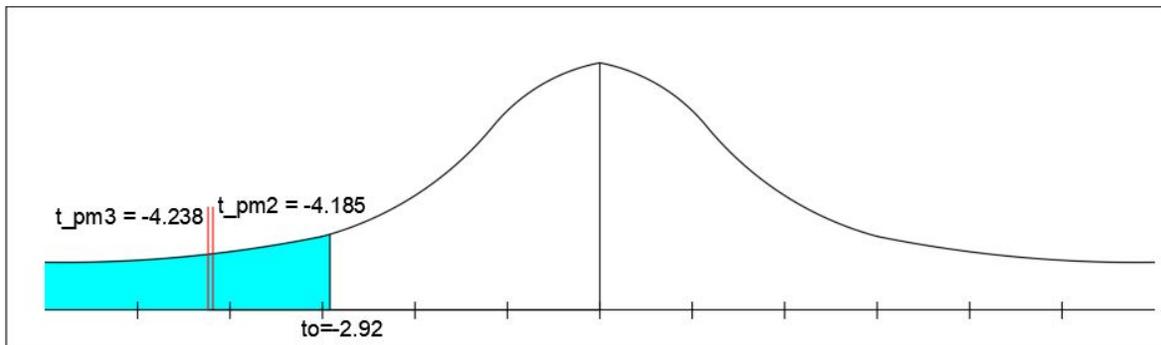
S = desviación estándar

De la tabla de distribución t-student para un $GL=2$ y nivel de significancia de 5 % se obtiene

$t_0 = 2.92$

Figura 50

Distribución T-student para los resultados de la ductilidad



Nota. Elaboración propia.

4.2.- Análisis e interpretación

1.- Del análisis de la hipótesis n°1 se tiene que solo el espécimen PM3 está cumpliendo con el objetivo propuesto. Aparentemente se obtiene que a mayor cantidad de capas de caucho la resistencia tiende a cumplir con la hipótesis; sin embargo, estos resultados en el análisis cuantitativo mediante el método t-student se lograron debido a la desviación estándar, donde esta es mayor en la muestra PM3 lo que reduce el valor de t. Más allá del análisis de contrastación de hipótesis realizado se puede concluir que el número de capas de caucho presente en el SRD no influyó en la mayor o menor resistencia que alcanzaron ya que no se muestra una relación clara entre la cantidad de capas de caucho y la resistencia a la compresión alcanzada. Lo que es evidente es que en todas las probetas modificadas se obtuvo una reducción de la resistencia a la compresión.

2.- Del análisis de la hipótesis n°2 se observa que todos los especímenes modificados lograron el objetivo con amplia holgura, siendo la probeta PM2 el que se acerca más al resultado límite de 10 % de reducción máxima, influenciado también por la desviación estándar obtenida. Al igual que en el análisis de la hipótesis n°1, este resultado no muestra una relación entre la cantidad de capas de caucho presente en e SRD y el módulo de elasticidad obtenido, ya que se obtienen valores para

el PM2 menores al PM1 pero asu vez mayores a los obtenidos en la probeta PM3. Lo que se puede interpretar, por lo tanto, es que la inclusión del SRD (sin importar la cantidad de capas de caucho) reduce el módulo de elasticidad en una cantidad menor al 10 % de la obtenida en una probeta convencional.

3.- Del análisis de la hipótesis n°3 se observa que el SRD no cumplió el objetivo de aumentar en 50 % la ductilidad de la probetas modificadas; al contrario, se observa que esta va decayendo a medida que aumenta las capas de caucho presente en el SRD llegando incluso a ser menor que la ductilidad alcanzada por la probeta convencional (caso del PM3). El resultado del análisis de contrastación de hipótesis muestra un aparente acercamiento de las probetas PM2 y PM3 a la zona de aceptación de resultados; sin embargo, esto es debido a la mayor desviación estándar obtenido en estas probetas en comparación con la probeta PM1.

4.- De los tres ítems anteriores acerca de las hipótesis específicas se concluye para la hipótesis general, que no hay muestras de una mejora en la respuesta inelástica del concreto a compresión al adicionar el SRD. Aunque se evidencia una mayor concentración del daño en la zona que rodea al SRD lo que genera mayores deformaciones permanentes y que podría ser favorable en caso de que se quiera concentrar el daño en una zona y evitar una falla explosiva en otras.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

5.1.- Conclusiones

1.- El SRD no mejoró el comportamiento del concreto a fuerza de compresión en un ensayo monotónico ya que en general no se llegó a los resultados esperados. Sin embargo se obtuvieron resultados resaltantes en la zona inelástica en donde el SRD mostró sus mayores efectos.

2.- La inclusión del SRD reduce la resistencia a la compresión. Se observa que las resistencias a la compresión son muy cercanas entre las probetas modificadas y que además el espécimen PM2 tiene mayor resistencia que el PM1 y asu vez mayor al PM3. Por lo tanto, no se puede llegar a concluir que existe una relación entre la resistencia alcanzada y el número de capas de caucho presentes en el SRD, más que solo decir que el SRD reduce la resistencia a la compresión en un valor mayor al 10 % respecto a la probeta convencional.

3.- El SRD reduce el módulo de elasticidad de las probetas modificadas en una cantidad menor al 10 %; aunque al igual que con la resistencia a la compresión, los valores obtenidos son tan cercanos y variables entre las probetas modificadas ya que se observa que el espécimen tiene un módulo de elasticidad menor al PM1 y asu vez menor al PM3. Por lo tanto, no se puede concluir que existe una relación entre los valores del módulo de elasticidad y el número de capas de caucho presentes en el SRD, más que solo decir que el SRD reduce el módulo de elasticidad en un valor menor al 10 % previsto.

4.- Se observa que el SRD aumenta ligeramente la ductilidad de las probetas modificadas pero que esta va reduciendo a medida que se incrementa la cantidad de capas de caucho en el SRD como se vió en el caso de la probeta PM3 (04 capas de caucho entre láminas de acero) en donde incluso se obtuvo una reducción del 4.19 % respecto a la probeta convencional. De esto se puede decir que a mayor cantidad de capas de caucho presente en el SRD, menor es la ductilidad alcanzada por las probetas cuando estas son ejercidas a fuerzas de compresión monotónica.

5.- El SRD tiene mayor efecto en la zona post fluencia ya que se vió mediante un análisis de elementos finitos en el programa Abaqus que, aunque las ductilidades no se incrementan sustancialmente, los especímenes modificados tienen mayor capacidad de disipación de energía debido a que experimentan mayores deformaciones residuales a causa de una concentración del daño, antes

de llegar a la falla.

6.- Como se vió en el análisis en elementos finitos, el SRD concentra los esfuerzos de compresión y tensión en las probetas modificadas generando que la falla se inicie en la zona que rodea al SRD donde existe una reducción de área del concreto. Lo que es confirmado por la forma en la que fallan las probetas modificadas en el ensayo experimental.

7.- Las planchas de acero permiten una adherencia adecuada con el concreto evitando el contacto directo entre este y el caucho, tal y como se vió en las formas de falla de las probetas modificadas tanto en los ensayos experimentales como en los ensayos numéricos en el programa Abaqus. En ambos se observa que las probetas dejan una columna de concreto adherida constantemente a las planchas de acero.

8.- Este trabajo muestra también que la industria de la construcción puede ayudar a la reducción de los efectos nocivos que tiene el caucho desechado de llantas vehiculares en el medio ambiente. Para ello se necesita realizar investigaciones de distinto tipo que demuestren, mediante una perspectiva de prueba y error, una mejora en las propiedades del material de construcción o comportamiento del sistema estructural en general; como ya se ha demostrado en el caso de pavimentos asfálticos con inclusión de caucho triturado.

5.2.- Recomendaciones

1.- En los ensayos se vió que las probetas fallan por la zona alrededor del SRD, en donde curiosamente se tiene un contacto directo entre el caucho y el concreto; se recomienda evitar o tratar previamente el caucho de tal manera de mejorar la rugosidad y obtener resultados que concluyan en la mejora o no del comportamiento de las probetas a fuerza de compresión.

2.- Si bien el trabajo trató del comportamiento de concreto únicamente a fuerza de compresión; se

puede extender al estudio del efecto del SRD (con la recomendación dada en el ítem 1) acerca de la respuesta a fuerzas de tracción mediante ensayos experimentales.

3.- Igual de importante es realizar un ensayo de carga-descarga en probetas de concreto con adición del SRD y contrastar los resultados a través de algún software en elementos finitos como el programa Abaqus, usado en esta investigación. Mediante este tipo de ensayo se puede obtener con mayor certeza el daño en tracción y compresión así como los desplazamientos inelásticos de las probetas de concreto.

4.- Ya que en este trabajo no se observó una relación entre la resistencia a la compresión o el módulo de elasticidad obtenidos en función de la cantidad de capas de caucho presente en el SRD, se recomienda aumentar la cantidad de caucho en el SRD (realizando esta vez un tratamiento del caucho que mejore la rugosidad frente al concreto) y definir la relación entre los parámetros mencionados y la cantidad de capas de caucho colocadas en el SRD.

5.3.- Trabajos futuros

En el futuro se planea realizar las siguientes investigaciones afín de extender el entendimiento del uso del caucho en el concreto. A continuación se listan trabajos pensados realizar próximamente.

1.- Influencia del SRD en elementos sometidos a flexión con el objetivo de ver su efecto en la resistencia a flexión y la deflexión presente.

2.- Se planea estudiar el efecto del SRD en el amortiguamiento que puede presentar un elemento de concreto mediante la aplicación de una carga del tipo "pulso". El objetivo es estudiar el nivel de amortiguamiento que alcanza y su efecto en la demanda sísmica.

3.- Estudiar la formación de rótulas plásticas en un pórtico de concreto armado colocando el SRD en los extremos de vigas y columnas como se propuso en esta investigación.

Referencias Bibliográficas

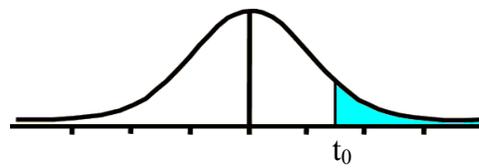
- Abugattas Delgado, C.L. & Carnero Arias, G.E. (2020). *Investigación sobre la realidad del caucho en desuso en Perú comparándolo con otros países*(tesis de grado). Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú.
- Altun, F., Haktanir, T. & Ari, K. (2007). Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials*, 21(3), 654-661. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.12.006
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K. & Quéneudec, M. (2006). Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded waste. *Cement & Concrete Composites*, 28(7), 650-657. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.006
- Borja, M. (2012). *Metodología de la investigación para ingenieros*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/manborja/metodologia-de-inv-cientifica-para-ing-civil>
- Flores Medina, N., Flores Medina, D., Hernández-Olivares, F. & Navacerrada, M.A. (2017). Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres tyre recycling. *Construction and Building Materials*, 144, 563-573. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196
- Gholampour, A., Ozbakkaloglu, T. & Hassanli, R. (2017). Behavior of rubberized concrete under active confinement. *Construction and Building Materials*, 138, 372-382. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.105
- Gudsoorkar, U. & Bindu, R. (2021). Computer simulation of hyper elastic re-treaded tire rubber with ABAQUS. *Materials Today: Proceedings*, 43(2), 1992-2001. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.432

- Holschemacher, K., Mueller, T. & Ribakov, Y. (2010). Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design*, 31(5), 2604-2615. doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.025
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482. doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.015
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith V., J., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman Tareq, Md., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. & Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 155, 104679. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104679
- Noaman, A.T., Abu Bakar, B.H. & Md. Akil, H. (2016). Experimental investigation on compression toughness of rubberized steel fibre concrete. *Construction and Building Materials*, 115, 163-170. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.022
- Noaman, A.T., Abu Bakar, B.H. & Md. Akil, H. (2017). Investigation on the mechanical properties of rubberized steel fiber concrete. *Engineering Structures and Technologies*, 9(2), 79-92. doi: 10.3846/2029882X.2017.1309301
- Peláez Arroyave, G.J., Velásquez Restrepo, S.M. & Giraldo Vásquez, D.H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. doi: 10.18359/rcin.2143
- Qingfu, L., Wei, G. & Yihang, K. (2020). Parameter calculation and verification of concrete plastic damage model of ABAQUS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 794(1): 012036. doi: 10.1088/1757-899X/794/1/012036

- Roychand, R., Gravina, R.J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O. & Mills, J.E. (2020). A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237, 117651. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
- Shahzada, M., Kamranb, A., Zeeshan Siddiquia, M. & Farhana, M. (2015). Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material. *Materials Research*, 18(5), 918-924. doi: 10.1590/1516-1439.320414
- Shu, X. & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67(Part B), 217-224. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027
- Siddika, A., Abdullah Al Mamun, Md., Alyousef, R, Mugahed Amran, Y.H., Aslani, F. & Alabduljabbar, H. (2019). Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 711-731. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1084-1092. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.021
- Supo, J. (2012). *Seminarios de investigación científica*. Recuperado de: https://kupdf.net/download/investigacion-cientifica-jos-eacute-sup0-pdf_58f42a6adc0d60c24cda983e_pdf
- Turatsinze, A. & Garros, F. (2008). On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates. *Resources, Conservation & Recycling*, 52(10), 1209-1215. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.06.012
- Van Engelen, N.C. (2019). Fiber-reinforced elastomeric isolators: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105621. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.03.035

ANEXOS

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
51	0.6793	1.2984	1.6753	2.0076	2.4017	2.6757
52	0.6792	1.2980	1.6747	2.0066	2.4002	2.6737
53	0.6791	1.2977	1.6741	2.0057	2.3988	2.6718
54	0.6791	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
55	0.6790	1.2971	1.6730	2.0040	2.3961	2.6682
56	0.6789	1.2969	1.6725	2.0032	2.3948	2.6665
57	0.6788	1.2966	1.6720	2.0025	2.3936	2.6649
58	0.6787	1.2963	1.6716	2.0017	2.3924	2.6633
59	0.6787	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
61	0.6785	1.2956	1.6702	1.9996	2.3890	2.6589
62	0.6785	1.2954	1.6698	1.9990	2.3880	2.6575
63	0.6784	1.2951	1.6694	1.9983	2.3870	2.6561
64	0.6783	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6549
65	0.6783	1.2947	1.6686	1.9971	2.3851	2.6536
66	0.6782	1.2945	1.6683	1.9966	2.3842	2.6524
67	0.6782	1.2943	1.6679	1.9960	2.3833	2.6512
68	0.6781	1.2941	1.6676	1.9955	2.3824	2.6501
69	0.6781	1.2939	1.6672	1.9949	2.3816	2.6490
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479
71	0.6780	1.2936	1.6666	1.9939	2.3800	2.6469
72	0.6779	1.2934	1.6663	1.9935	2.3793	2.6458
73	0.6779	1.2933	1.6660	1.9930	2.3785	2.6449
74	0.6778	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
75	0.6778	1.2929	1.6654	1.9921	2.3771	2.6430
76	0.6777	1.2928	1.6652	1.9917	2.3764	2.6421
77	0.6777	1.2926	1.6649	1.9913	2.3758	2.6412
78	0.6776	1.2925	1.6646	1.9908	2.3751	2.6403
79	0.6776	1.2924	1.6644	1.9905	2.3745	2.6395
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387
81	0.6775	1.2921	1.6639	1.9897	2.3733	2.6379
82	0.6775	1.2920	1.6636	1.9893	2.3727	2.6371
83	0.6775	1.2918	1.6634	1.9890	2.3721	2.6364
84	0.6774	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
85	0.6774	1.2916	1.6630	1.9883	2.3710	2.6349
86	0.6774	1.2915	1.6628	1.9879	2.3705	2.6342
87	0.6773	1.2914	1.6626	1.9876	2.3700	2.6335
88	0.6773	1.2912	1.6624	1.9873	2.3695	2.6329
89	0.6773	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316
91	0.6772	1.2909	1.6618	1.9864	2.3680	2.6309
92	0.6772	1.2908	1.6616	1.9861	2.3676	2.6303
93	0.6771	1.2907	1.6614	1.9858	2.3671	2.6297
94	0.6771	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6291
95	0.6771	1.2905	1.6611	1.9852	2.3662	2.6286
96	0.6771	1.2904	1.6609	1.9850	2.3658	2.6280
97	0.6770	1.2903	1.6607	1.9847	2.3654	2.6275
98	0.6770	1.2903	1.6606	1.9845	2.3650	2.6269
99	0.6770	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 031-2022-FIMGC

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 099-2022-FIMGC-D**, siendo los veintitrés días del mes de mayo del 2022, a horas 11:00 a.m.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, Jurado el **MSc. Ing. Rolando CISNEROS AYALA**, Jurado - Asesor el **MSc. Ing. Javier Francisco TAIBE CARBAJAL** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada **“COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ANTE CARGAS DE COMPRESIÓN CON INCLUSIÓN DEL DISPOSITIVO SRD COMPUESTO DE CAPAS DE CAUCHO RECICLADOS Y LÁMINAS DE ACERO”**, sustentado por el señor **Jorge Frank TOVAR RODRÍGUEZ**, Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil.

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **16 (Dieciséis)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.



Dr. Efraín Elías Porras Flores
DECANO

Firmado digitalmente
por Dr. Ing. Efraín Elías
Porras Flores

Fecha:
07:24:25 -09'00'

Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES
Presidente

MSc. Ing. Rolando CISNEROS AYALA
Jurado

MSc. Ing. Javier Francisco TAIBE CARBAJAL
Jurado Asesor

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Secretario del Proceso

c.c.:
Bach. Jorge Frank TOVAR RODRÍGUEZ
Jurados (3)
Archivo



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 029-2022-FIMGC

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH y Resolución Decanal N° 158-2021-FIMGC-UNSCH-D, deja constancia que Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : TOVAR RODRIGUEZ, JORGE FRANK
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : "Comportamiento del concreto ante cargas de compresión con inclusión del dispositivo SRD, compuesto de capas de caucho reciclados y láminas de acero"
Evaluación de la Originalidad : 6 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 1838481306

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 17 de mayo del 2022

Firmado digitalmente
por LEZAMA CUELLAR
CHRISTIAN

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
de la FIMGC

Con depósito para Sustentación y Tramite de Titulo

"Comportamiento del concreto ante cargas de compresión con inclusión del dispositivo SRD, compuesto de capas de caucho reciclados y láminas de acero"

por Jorge Frank Tovar Rodriguez

Fecha de entrega: 17-may-2022 11:38a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1838481306

Nombre del archivo: Tesis_TOVAR_RODRIGUEZ,JORGE_FRANK.pdf (8.13M)

Total de palabras: 13564

Total de caracteres: 69927

"Comportamiento del concreto ante cargas de compresión con inclusión del dispositivo SRD, compuesto de capas de caucho reciclados y láminas de acero"

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.scielo.org.co Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	ri.uaq.mx Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1%

9	intercasa.galeon.com Fuente de Internet	<1 %
10	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
11	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.uc.cl Fuente de Internet	<1 %
13	www.funlam.edu.co Fuente de Internet	<1 %
14	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo