



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO PARA SHOTCRETE:
MODELACIÓN NUMÉRICA EN BASE A ELEMENTOS FINITOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS FELIPE REYES MARTÍNEZ

PROFESOR GUÍA:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO HERRERA MARDONES

RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS

SANTIAGO DE CHILE

2015

“COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO PARA SHOTCRETE: MODELACIÓN NUMÉRICA EN BASE A ELEMENTOS FINITOS”

El uso del shotcrete se ha incrementado principalmente en obras mineras donde cumple una función primordial en el refuerzo de túneles. El aumento de la tecnología exige que este material se mantenga competente frente a los requerimientos de resistencia y ductilidad, para esto, el ensayo ASTM C1550-12 resulta conveniente al evaluar la capacidad de este material para absorber energía de deformación al encontrarse sometido a flexión. El ensayo consiste en inducir una carga puntual al centro de un disco de shotcrete que se encuentra apoyado en tres puntos simétricamente distribuidos en la base de éste, midiendo la fuerza y el desplazamiento en el centro. Producto de esto, se mide el área bajo la curva del gráfico carga desplazamiento, que representa la energía capaz de absorber el shotcrete como representación de su rigidez a la flexión. Esta investigación pretende realizar un modelo numérico en base a elementos finitos que reproduzca el ensayo ASTM C1550-12. De esta manera, el uso de un modelo de elementos finitos puede ser una herramienta de diseño alternativa o complementaria a los resultados experimentales. El modelo permitirá comparar la respuesta del shotcrete con diferentes refuerzos, evaluando la energía de deformación, el peak de carga, la pérdida de carga post-peak y la pendiente post-peak. Se confecciona un modelo de shotcrete sin refuerzo para obtener el módulo de elasticidad del material, posteriormente utilizado en los modelos de shotcrete reforzado con mallas geosintéticas y metálica. De forma complementaria, se confeccionan modelos para estudiar el efecto de la variación del módulo de elasticidad del shotcrete a refuerzo fijo, la importancia del espesor del refuerzo y la respuesta del sistema al variar el tipo de contacto entre el refuerzo y el shotcrete. Esto se resume en un total de 12 modelos.

El modelo permite representar el comportamiento del shotcrete reforzado, con la limitación de no incluir el daño del refuerzo en el material compuesto. Sin embargo, esto no altera el comportamiento lineal de los materiales, rescatando parámetros relevantes para el diseño de este material, tales como el módulo de elasticidad y el peak de carga.

*Dedico este trabajo con especial cariño a aquellas personas que fueron parte de este proceso y
dieron su apoyo incondicional.
Familia, mi Paci y amigos.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, que a pesar de la distancia estuvieron presentes con su preocupación y cariño. A cada uno de ellos, mis padres que dejaron en mí sus enseñanzas y valores dándome las fortalezas para enfrentar cualquier desafío en la vida. Y mis queridas hermanas, la Carly y la Javi, que me inspiraron alegría en momentos difíciles y esos especiales fines de semana en la casa.

Mi polola, la Paci estuvo en cada etapa de este proceso, en las buenas y en las malas, con esa paciencia infinita. Ambos como memoristas de la escuela, colapsados de tareas, informes y controles, logramos encontrar en ese caos un espacio para el amor, donde el simple hecho de ir de sala en sala se volvía hermoso contigo de la mano. Gracias por todo.

A los amigos de la pecera, donde nunca faltó la talla y el chiste, compartiendo los altos y bajos de este proceso.

Agradezco a mi Profesor guía, por su tiempo y dedicación en la confección de esta memoria.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. METODOLOGÍA.....	3
CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....	4
2.1. MODELACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO.....	4
2.2. DATOS EXPERIMENTALES ENSAYOS MALLAS GEOSINTÉTICAS: ASTM D66375	
2.3. DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO ASTM C1550.....	7
CAPITULO 3. ANÁLISIS DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO ASTM C1550-12.....	9
3.1. PEAK DE CARGA Y DEFLEXIÓN DE AGRIETAMIENTO	9
3.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD	12
3.3. COMPARACIÓN ENTRE PENDIENTE INICIAL Y POST-PEAK.....	14
3.4. ENERGÍA DE DEFORMACIÓN	16
CAPITULO 4. MODELAMIENTO EN BASE A ELEMENTOS FINITOS – MODELO WORKBENCH APDL.....	18
4.1. GENERALIDADES MODELACIÓN	18
4.1.1. MARCO TEORICO	18
4.1.2. GEOMETRÍA.....	23
4.1.3. CONDICIONES DE BORDE	24
4.1.4. MALLADO	26
4.2. MODELO DE DISCO DE SHOTCRETE SIN REFUERZO	27
4.2.1. MODELO LINEAL.....	27
4.2.2. MODELO NO LINEAL.....	29

4.3.	MODELO DE DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO.....	32
4.3.1.	RESULTADOS MODELO DISCO SHOTCRETE REFORZADO CON MALLA – CURVA CARGA VS DEFLEXIÓN	40
4.4.	ANÁLISIS POST PROCESAMIENTO	50
4.4.1.	VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL SHOTCRETE CON REFUERZO FIJO	50
4.4.2.	VARIACIÓN DEL ESPESOR DE REFUERZO EQUIVALENTE.....	54
4.4.3.	CAMBIO EN EL TIPO DE CONTACTO ENTRE EL SHOTCRETE Y EL REFUERZO EQUIVALENTE	56
4.4.4.	CHEQUEO DEL PERFIL DE DEFORMACIONES.....	58
4.4.5.	ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE CARGA.....	62
CAPITULO 5.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	69
5.1.	CONCLUSIONES	69
5.2.	DISCUSIÓN	72
5.3.	INVESTIGACIONES FUTURAS	73
CAPITULO 6.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ensayo ASTM 6637.	6
Figura 2-2: Geomalla triaxial TX160 y TX196.....	6
Figura 2-3: Geomalla uniaxial UX3340 y UX3316.	7
Figura 2-4: Vista superior ensayo ASTM C1550-12. Sistema de apoyos y medición mediante transductor lineal de deflexión variable (TLDV) (ASTM C1550, 2012).....	8
Figura 2-5: Vista Lateral Ensayo ASTM C1550-12 (ASTM C1550, 2012).	8
Figura 3-1: Curva carga vs deflexión ensayos ASTM C1550-12.	9
Figura 3-2: Peak de carga datos experimentales disco de shotcrete reforzado.	11
Figura 3-3: Deflexión en el peak de carga de datos experimentales disco de shotcrete reforzado.	11
Figura 3-4: Módulo de elasticidad de datos experimentales disco de shotcrete reforzado.	14
Figura 3-5: Reducción de pendientes de curva carga vs deflexión para ensayos de discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.	15
Figura 3-6: Energías de deformación absorbida obtenidas de datos experimentales de ensayo ASTM C1550-12.	17
Figura 4-1: SOLID65 3-D Solido de Concreto Reforzado (Theory References ANSYS 14.5)....	19
Figura 4-2: Comportamiento a Tracción con condición de agrietamiento (Theory References ANSYS 14.5).....	20
Figura 4-3: Comportamiento no lineal del concreto.....	22
Figura 4-4: Geometría Modelo Workbench APDL.....	24
Figura 4-5: Sistema de apoyo ensayo (ASTM C1550-12).	24
Figura 4-6: (a) Dimensiones pistón de carga (ASTM C1550, 2012), (b) Pistón de carga modelo Workbench APDL.	25
Figura 4-7: Mallado Disco de shotcrete reforzado - vista lateral.	27
Figura 4-8: Ley constitutiva lineal del shotcrete $E=1592$ [MPa].	28
Figura 4-9: Curva carga vs deflexión modelo lineal shotcrete sin refuerzo.....	28
Figura 4-10: Ley constitutiva shotcrete, modelo lineal con agrietamiento $E=1592$ [MPa]	29
Figura 4-11: Carga vs deflexión disco de shotcrete sin refuerzo $E=1592$ [MPa].....	30

Figura 4-12: Deformaciones elásticas máximas principales, paso posterior al peak de carga, vista inferior disco de shotcrete sin refuerzo.....	30
Figura 4-13: Deformaciones de agrietamiento, en rojo – vista inferior disco de shotcrete no reforzado.....	31
Figura 4-14: Deformaciones de agrietamiento - disco de shotcrete no reforzado.....	31
Figura 4-15: Distribución de deformaciones equivalentes, vista inferior disco de shotcrete sin refuerzo - modelo no lineal. Instante posterior al agrietamiento (izquierda). Ensayo experimental investigación Moffat, patrón de falla Ensayo ASTM C1550-04. (derecha).....	32
Figura 4-16: Modelo bilineal refuerzo.	33
Figura 4-17: Curvas tensión vs deformación bilineales mallas de refuerzo.....	34
Figura 4-18: Curva tensión vs deformación bilineal malla metálica.....	34
Figura 4-19: Modelo sistema paralelo de compuesto unidireccional, que considera un material de refuerzo y una matriz de shotcrete, aplicando una carga P_c y con un módulo de elasticidad del compuesto E_c	35
Figura 4-20: Ley constitutiva material compuesto, refuerzo equivalente.	37
Figura 4-21: Ley constitutiva materiales compuestos, refuerzos geosintéticos equivalentes en un disco de espesor 2 [mm].	39
Figura 4-22: Ley constitutiva materiales compuestos, refuerzo malla metálica equivalente en un disco de espesor 2 [mm].	39
Figura 4-23: Modelación numérica - Carga vs deflexión modelo discos de shotcrete reforzados con geomallas.....	41
Figura 4-24: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196.	42
Figura 4-25: Relación entre parámetros obtenidos del modelo TX196 con datos experimentales.	43
Figura 4-26: Comparación entre energía absorbida de deformación acumulada obtenida del modelo T196 con datos experimentales.	44
Figura 4-27: Carga vs deflexión modelo disco de shotcrete reforzado con geomalla TX160.	44
Figura 4-28: Relación entre parámetros obtenidos del modelo TX160 con datos experimentales.	45
Figura 4-29: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo TX160 con datos experimentales.....	45
Figura 4-30: Carga vs deflexión modelo disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3316.	46

Figura 4-31: Relación entre parámetros obtenidos del modelo UX3316 con datos experimentales.	47
Figura 4-32: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3316 con datos experimentales.....	47
Figura 4-33: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3340.....	48
Figura 4-34: Relación entre parámetros obtenidos del modelo UX3340 con datos experimentales.	48
Figura 4-35: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3340 con datos experimentales.....	49
Figura 4-36: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con malla metálica C139.	49
Figura 4-37: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3316 con datos experimentales.....	50
Figura 4-38: Curva esfuerzo deformación shotcrete para diferentes E_s	51
Figura 4-39: Curva esfuerzo deformación material de refuerzo equivalente TX196 - variación del módulo de elasticidad del shotcrete.....	52
Figura 4-40: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 - Variación del módulo de elasticidad del shotcrete.....	53
Figura 4-41: Variación del espesor del disco de refuerzo equivalente.....	54
Figura 4-42: Curva carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con malla geosintética TX196 - variación del espesor del disco de refuerzo equivalente.	54
Figura 4-43: Variación de la pérdida de carga post-peak en función del espesor del refuerzo equivalente – Curva carga vs deflexión Modelo TX196.....	55
Figura 4-44: Variación de la pendiente post peak en curva carga deflexión en función del espesor de refuerzo equivalente – Curva carga vs deflexión Modelo TX196.....	56
Figura 4-45: Carga vs deflexión de disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 - cambio del tipo de contacto entre shotcrete y refuerzo equivalente.	57
Figura 4-46: Perfil de deformaciones a 60 mm del centro del disco.....	59
Figura 4-47: Perfil de deformaciones a 60 mm del centro del disco.....	59
Figura 4-48: Deformaciones principales a 200 mm del centro del disco.	60
Figura 4-49: Perfil de deformaciones a 200 mm del centro del disco.....	60
Figura 4-50: Deformaciones máximas a 300 mm del centro del disco.	61

Figura 4-51: Perfil de deformaciones en peak de carga a 300 mm del centro del disco.	61
Figura 4-52: Agrietamiento de franjas disco de shotcrete reforzado TX196, después del peak de carga.....	63
Figura 4-53: Sistema disco de refuerzo equivalente - no agrietado.	64
Figura 4-54: Sistema refuerzo equivalente – agrietado.....	64
Figura 4-55: Ley constitutiva del compuesto considerando la pérdida de aporte del shotcrete y la compatibilidad de deformaciones.....	65
Figura 4-56: Porcentajes de caída de carga para ensayos ASTM C1550-12 de shotcrete reforzado con geomallas.	66
Figura 4-57: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196.	67
Figura 4-58: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla TX160.	67
Figura 4-59: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3316.....	68
Figura 4-60: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3340.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Coeficientes función tensión deformación geogrillas.	7
Tabla 3-1: Datos Experimentales Peak de carga y deflexión.	10
Tabla 3-2: Módulo de Elasticidad Ensayos.	13
Tabla 3-3: Pendientes post-peak de carga de la curva carga vs deflexión para ensayos de discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.	15
Tabla 3-4: Energía Absorbida Ensayos ASTM C1550-12.	16
Tabla 4-1: Constantes modelación elemento Solid 65, Ansys.	21
Tabla 4-2: Parámetros concreto Solid65.	22
Tabla 4-3: Dimensiones Geometría Modelo Workbench APDL.	23
Tabla 4-4: Tipos de contactos definidos en modelación disco de shotcrete reforzado ASTM C1550-12.	26
Tabla 4-5: Parámetros ley constitutiva bilineal mallas de refuerzo.....	33
Tabla 4-6: Fracciones de volumen de mallas de refuerzo.	36
Tabla 4-7: Parámetros ley constitutiva material de refuerzo equivalente en disco de 2 [mm].....	38
Tabla 4-8: Pérdida de carga y pendiente post-peak de curva carga vs deflexión para discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.	42
Tabla 4-9: Módulo de elasticidad del shotcrete y deflexión de agrietamiento del sistema.	53
Tabla 4-10: Cambio de pendiente post peak entre modelo “bonded” y “frictionless”.....	58
Tabla 4-11: Promedios de reducción de carga en porcentaje respecto del peak, para discos de shotcrete con diferentes refuerzos geosintéticos utilizados en ensayos de laboratorio.	62
Tabla 4-12: Distribución de carga por rigidez discos de shotcrete reforzados con geomallas.....	66

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Actualmente el shotcrete es utilizado principalmente como elemento primario y secundario de sostenimiento y estabilización (sistema de fortificación) de suelo/roca en aplicaciones de la minería subterránea, túneles en obras civiles y taludes, de manera de controlar grietas, deformaciones y proveer resistencia. En general, el shotcrete es reforzado con fibras o malla metálica de manera de ganar ductilidad con respecto al shotcrete no reforzado y poder resistir cargas estáticas y dinámicas desarrollando grandes deformaciones. El shotcrete actúa como una capa delgada (o cubierta) que evita la caída de bloques o material entre pernos de anclaje. El shotcrete resiste este peso deformándose principalmente en flexión hasta que se excede su resistencia a la tracción inducida por flexión causando su fractura. De esta manera, la resistencia a la flexión del shotcrete es un parámetro clave para el diseño de éste. Por otro lado, ensayos estáticos en shotcrete reforzado con fibra o malla metálica han demostrado que éste puede seguir resistiendo carga incluso para altos niveles de agrietamiento. El área bajo la curva fuerza-deformación es la energía absorbida por el sistema y puede ser utilizada como criterio de diseño para cargas que se estima que inducen grandes deformaciones en el shotcrete. (Cengiz, Turanli, 2003).

Este trabajo de título busca explorar mediante el desarrollo de modelos numéricos la posibilidad de utilizar materiales no convencionales en el refuerzo del shotcrete, comúnmente encontrados en otras aplicaciones de la ingeniería civil tales como fibras sintéticas (ingeniería geotécnica y marítima) de manera de aumentar la energía absorbida y/o capacidad de carga del shotcrete según requerimientos de diseño. De esta forma se pueden expandir los conocimientos que se tienen sobre el comportamiento y diseño del shotcrete reforzado de manera de presentar alternativas de diseño que pueden cumplir de mejor manera, relativo a la disponibilidad ya existente, los requisitos de diseño establecidos por una aplicación específica.

La motivación de este estudio se basa en las nuevas exigencias planteadas en el diseño del shotcrete reforzado por la complejidad de las obras asociadas a la minería, ingeniería vial e industria energética y el volumen de material utilizado. Los requerimientos de diseño de los sistemas de fortificación utilizados para una aplicación dada imponen condiciones sobre las características

mecánicas y la respuesta de éstos ante las cargas de diseño consideradas. En el caso particular del shotcrete, se pueden mencionar los siguientes requisitos (Stacey et al, 1995; Kirsten, 1998; Malmgren, 2005; Bernard, 2009):

- Evitar problemas de corrosión que induce una degradación del shotcrete y altos costos de mantenimiento.
- Desarrollar grandes deformaciones, asociadas a una alta capacidad residual, capacidad de redistribuir tensiones y control de grietas.
- Adaptarse a procesos de producción minera. Zonas que han sido fortificadas son explotadas, por lo que el shotcrete debe ser elemento de fácil trituración.
- Reducir la abrasión en las mangueras utilizadas para la colocación del shotcrete cuando se utilizan fibras de algún material como refuerzo.
- Reducir la relación masa material de refuerzo por unidad de volumen del shotcrete.
- Disminuir costos de transporte a áreas remotas o de difícil acceso.
- Aumentar la seguridad de trabajadores.

1.2. OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un modelo de elementos finitos 3D, de manera de reproducir el Ensayo (ASTM C1550, 2012) que mide la rigidez a la flexión del shotcrete. Esto, con tal de comparar la respuesta de probetas de shotcrete utilizando distintos refuerzos.

Objetivos específicos

- Modelar shotcrete sin refuerzo, reforzado con malla metálica y con malla sintética.
- Evaluar las hipótesis de modelación numérica con los datos de ensayos experimentales.
- Evaluar la función del material de refuerzo con respecto a la capacidad máxima, capacidad residual, energía absorbida (ductilidad) y patrón de falla del sistema.
- Análisis de datos experimentales: Mallas sintéticas ASTM 6637 y Discos de Shotcrete reforzado ASTM C1550-04.

1.3. METODOLOGÍA

- Utilizando el software de elementos finitos ANSYS, se crea la geometría del disco de shotcrete, sin refuerzo y con malla de refuerzo.
- Se definen las propiedades del shotcrete y del refuerzo, incorporando su ley constitutiva al programa. Se añade la curva de histéresis predeterminada del programa, mientras que para el refuerzo se obtendrán de datos experimentales.
- Se representan las condiciones de borde (apoyos y carga) con tal de reproducir el ensayo de la norma ASTM C1550, 2012.
- Se definen las características de contactos entre materiales.
- Obtener los siguientes parámetros como resultado de la modelación para comparar resultados; primer peak de carga, carga última, energía absorbida a 5 [mm]. Estos valores se obtendrán de los siguientes gráficos; Carga [kN] – deflexión [mm] y Energía [J] – deflexión [mm].
- Verificar patrón de falla con respecto al ensayo ASTM C1550-12.
- Análisis batería de datos experimentales.
- Comparación entre resultados modelación numérica y datos experimentales.
- Conclusiones

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1. MODELACIÓN DE SHOTCRETE REFORZADO

Producto de la importancia de la interacción shotcrete reforzado con el terreno nace la necesidad de obtener parámetros de diseño que aseguren la estabilidad y sostenimiento de la construcción. Como herramienta complementaria, el modelamiento numérico del shotcrete ha sido motivo de discusión e investigación por diversos autores con el objetivo de predecir la respuesta de este material con diferentes refuerzos, tales como fibras metálicas, sintéticas y mallas.

Nunes y Pouzada (2001) realizaron un modelo numérico en 3D de un disco de shotcrete, siguiendo las características del ensayo ASTM C1550. En ese estudio se busca predecir la rigidez a flexión del shotcrete reforzado con fibra variando la orientación de esta y la temperatura del material. Luego, los resultados del modelo son contrastados con ensayos experimentales, obteniendo suficiente correlación para concluir que el modelo confeccionado representa el comportamiento del shotcrete en el rango lineal de los materiales.

Se observaron diferencias en los resultados del modelo de aproximadamente un 13% con lo obtenido experimentalmente. Según los autores, esto pudo deberse a los siguientes factores; las propiedades del material usadas en el modelo no fueron certeras, la fuerza fue aplicada en un punto y se considera la aplicación de una fuerza estática, contrario al ensayo, que es controlado por deformaciones.

Cengiz y Turanli (2003) realizaron ensayos a un panel rectangular de shotcrete reforzado, comparando la respuesta a flexión utilizando diferentes refuerzos, entre estos, malla metálica, fibra de acero y fibra de polipropileno de alto rendimiento. En el ensayo de panel se esperan los mismos resultados que el ensayo ASTM C1550, estos son; primer peak de carga, carga última y capacidad de absorber energía.

Como resultados de estos ensayos, los autores destacan que los paneles reforzados con malla metálica presentaron una mayor absorción de energía que los reforzados con fibra de acero. Esto se debe a que la malla metálica tiene una mayor superficie de contacto con el concreto que la fibra de acero. Además los esfuerzos generados por fricción son superiores en el caso del refuerzo de malla. Resumiendo, la energía absorbida a una deflexión de 25 mm es 1.5 veces mayor que el panel reforzado con fibra de acero.

Respecto a la forma de falla, los paneles reforzados con malla metálica fallaron principalmente por punzonamiento, mostrando evidencia de daños por esfuerzos en flexión. Los paneles reforzados con fibras; acero y polipropileno fallaron principalmente por flexión.

Rambo, Silva y Filho (2013), confeccionaron un modelo numérico del ensayo ASTM C1550 utilizando discos de shotcrete con fibra de acero y hormigón auto compactante. De forma complementaria realizan ensayos experimentales con el fin de validar el modelo. Los datos analizados son los requeridos por la norma y al compararlos con los ensayos de laboratorio se observa una adecuada correlación entre datos.

Los autores expresan la enorme contribución de un modelo numérico como herramienta de diseño estructural del shotcrete, donde el ensayo ASTM C1550 cumple la función de validador del modelo. Además, tiene la ventaja de obtener los mismos resultados que el ensayo ahorrando bastante tiempo de laboratorio.

La información extraída de estos autores será utilizada para la creación del modelo numérico.

2.2. DATOS EXPERIMENTALES ENSAYOS MALLAS GEOSINTÉTICAS: ASTM D6637

De forma complementaria a este estudio, en el laboratorio de sólidos de la facultad de ingeniería de la Universidad de Chile se realizaron ensayos de diferentes mallas geosintéticas, como alternativa de refuerzo del Shotcrete. Como objetivo de este estudio, se planteó obtener la caracterización de la curva tensión deformación hasta la falla. Las curvas obtenidas fueron ingresadas al modelo ANSYS para representar el comportamiento del Shotcrete reforzado con Malla Geosintética.

Se utilizó la norma ASTM D6637, la cual determina las condiciones a las cuales debe someterse la malla de refuerzo con el fin de certificar el material. Este ensayo se muestra en la Figura 2-1, que consiste en someter el espécimen a esfuerzos de tracción con tal de establecer una curva tensión deformación, adjuntas en la sección A de Anexos.



Figura 2-1: Ensayo ASTM 6637.

Se ensayan cuatro refuerzos, que corresponden a mallas geosintéticas o geomallas fabricadas a base de polipropileno; TX160, TX196, UX3340 y UX3316, dos modelos triaxiales y dos uniaxiales, respectivamente. La geometría de las mallas triaxiales o TX se muestra en la Figura 2-2, diferenciándose solo en las dimensiones.

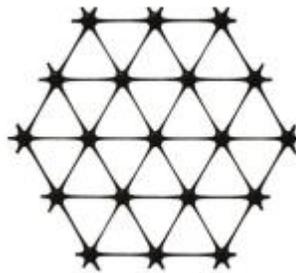


Figura 2-2: Geomalla triaxial TX160 y TX196.

En la Figura 2-3 se muestra la geometría de las mallas uniaxiales o UX.

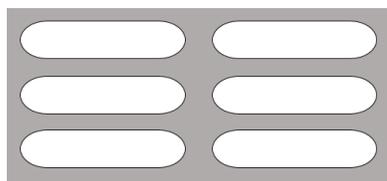


Figura 2-3: Geomalla uniaxial UX3340 y UX3316.

Las curvas resultantes del ensayo se aproximan a un polinomio de la siguiente forma:

$$\sigma = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$$

donde σ representa la tensión aplicada y x la deformación alcanzada. Los coeficientes a , b , c y d se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Coeficientes función tensión deformación geogrillas.

GEOMALLA	a	b	c	d	R ²
TX160	174.051,0	-42.788,0	5.250,1	0,0	0,96
TX196	0,0	-23.410,0	4.800,9	0,0	0,99
UX3340	27.995,0	-24.877,0	4.310,3	0,0	0,99
UX3316	0,0	-30.590,0	5.467,0	0,0	0,99

2.3. DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO ASTM C1550

Durante el 2012 y 2013, Ricardo Moffat, realizó diversos ensayos de discos de shotcrete, guiándose por la normativa ASTM C1550-12, con tal de comparar la influencia del refuerzo utilizado en la respuesta del shotcrete.

Se realizaron ensayos, de acuerdo a la norma ASTM C1550-12, confeccionando discos de shotcrete con distintas alternativas de refuerzo, en su mayoría mallas geosintéticas. En cada ensayo se registró la carga y deflexión en el centro del disco, pudiendo alcanzar desde 5 a 80mm. Con el gráfico carga-deflexión es posible determinar el peak de carga, rigidez inicial, carga residual y energía absorbida.

Los datos experimentales obtenidos fueron utilizados en esta investigación con el fin de establecer comportamientos entre refuerzos utilizados y validar la respuesta obtenida por los modelos de

elementos finitos. En la sección Anexos se muestra los gráficos carga vs deflexión para los distintos ensayos de laboratorio (Moffat, 2013).

La Figura 2-4 muestra una vista superior del ensayo ASTM C1550-12, en la que se aprecia el sistema de soporte, que consiste en 3 apoyos equidistantes del centro del disco o punto de carga, con una separación de 120° con respecto al eje vertical que cruza el centro del espécimen.

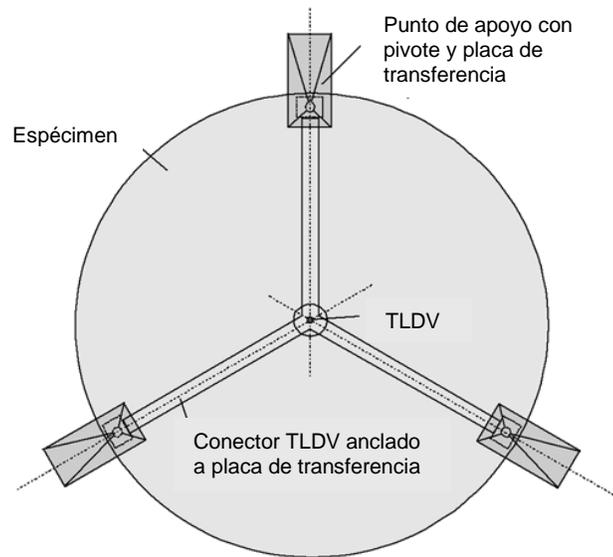


Figura 2-4: Vista superior ensayo ASTM C1550-12. Sistema de apoyos y medición mediante transductor lineal de deflexión variable (TLDV) (ASTM C1550, 2012).

En la Figura 2-5 se observa el pistón de carga ubicado en el centro del disco de shotcrete que controlará las deformaciones en el transcurso del ensayo.

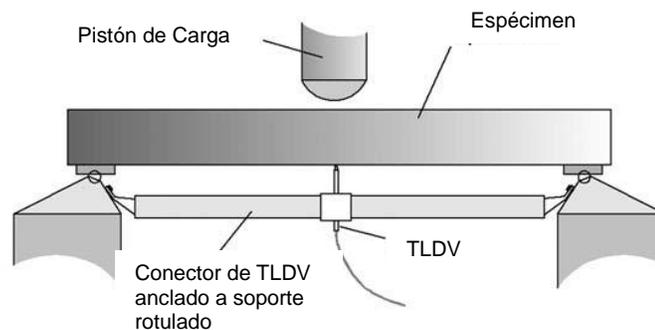


Figura 2-5: Vista Lateral Ensayo ASTM C1550-12 (ASTM C1550, 2012).

CAPITULO 3. ANÁLISIS DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO ASTM C1550-12

Al observar los gráficos carga vs deflexión resultantes de los ensayos de laboratorio (Sección Anexos) y tal como se muestra conceptualmente en la Figura 3-1, se destaca inicialmente una pendiente constante hasta alcanzar el peak de carga, dado por el agrietamiento del shotcrete. Posteriormente, el gráfico carga vs deflexión presenta una pendiente bastante menor a la inicial otorgada por el refuerzo y permitiendo al sistema tomar carga y contribuir en la energía de deformación.

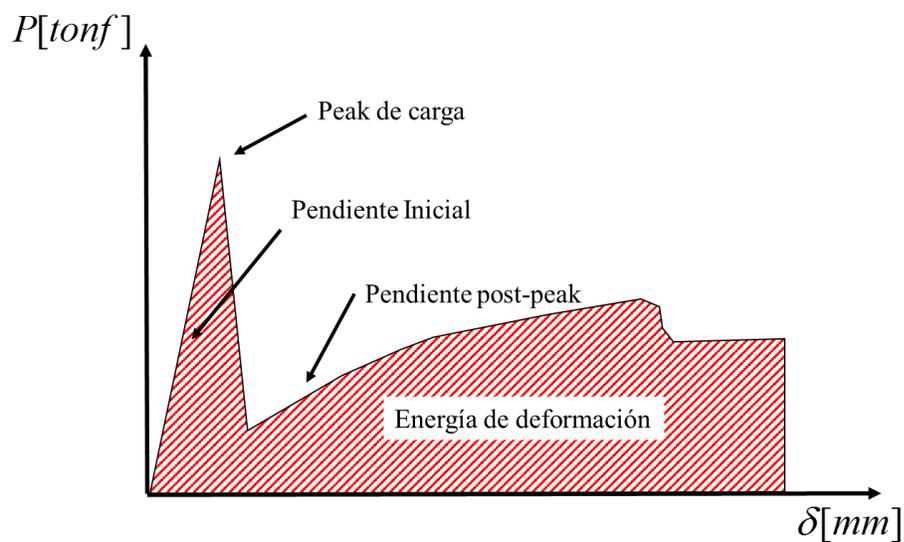


Figura 3-1: Curva carga vs deflexión ensayos ASTM C1550-12.

3.1. PEAK DE CARGA Y DEFLEXIÓN DE AGRIETAMIENTO

El peak de carga determina el instante de falla del disco de shotcrete reforzado, dando lugar a la formación de tres franjas de agrietamiento quedando expuesta la malla de refuerzo. La Tabla 3-1 muestra los parámetros peak de carga y deflexión en el peak correspondientes a cada ensayo.

Tabla 3-1: Datos Experimentales Peak de carga y deflexión.

Ensayo [-]	Refuerzo [-]	Peak de carga [tonf]	Deflexión [mm]
1	UX3316	0.49	1.07
2	UX3316	0.46	0.95
3	UX3316	0.58	0.96
1	UX3340	1.01	1.10
2	UX3340	1.24	1.40
3	UX3340	1.30	1.29
1	TX196	1.18	1.22
2	TX196	0.77	1.49
3	TX196	1.13	1.22
1	TX196	1.17	1.23
2	TX196	0.77	1.48
3	TX196	1.13	1.22
1	TX160	1.17	1.21
2	TX160	1.07	1.33
3	TX160	0.86	1.08
1	SIN REFUERZO	1.25	1.26
2	SIN REFUERZO	1.19	1.31
3	SIN REFUERZO	1.14	1.53
1	SIN REFUERZO	1.29	1.57

En el Figura 3-2 se presenta un resumen de los peak de carga por ensayo con el rango de variación del parámetro, indicando que este valor se mantiene relativamente constante en 1.1 [tonf] para todos los ensayos estudiados excepto para la malla geosintética UX3316, siendo que es similar a la geomalla UX3340 en cuanto a geometría y propiedades. Este refuerzo presenta un peak de carga un 43.6 [%] menor al promedio del resto de los ensayos. Esto podría deberse a defectos en la preparación de la mezcla, incluyendo la elección del árido y dosificación, lo que influiría directamente sobre la resistencia a la tracción del shotcrete, induciendo una disminución de tal magnitud sobre el peak de carga alcanzado. Considerando esto, se concluye que el peak de carga es independiente del refuerzo utilizado, dejando al shotcrete como principal responsable de este valor.

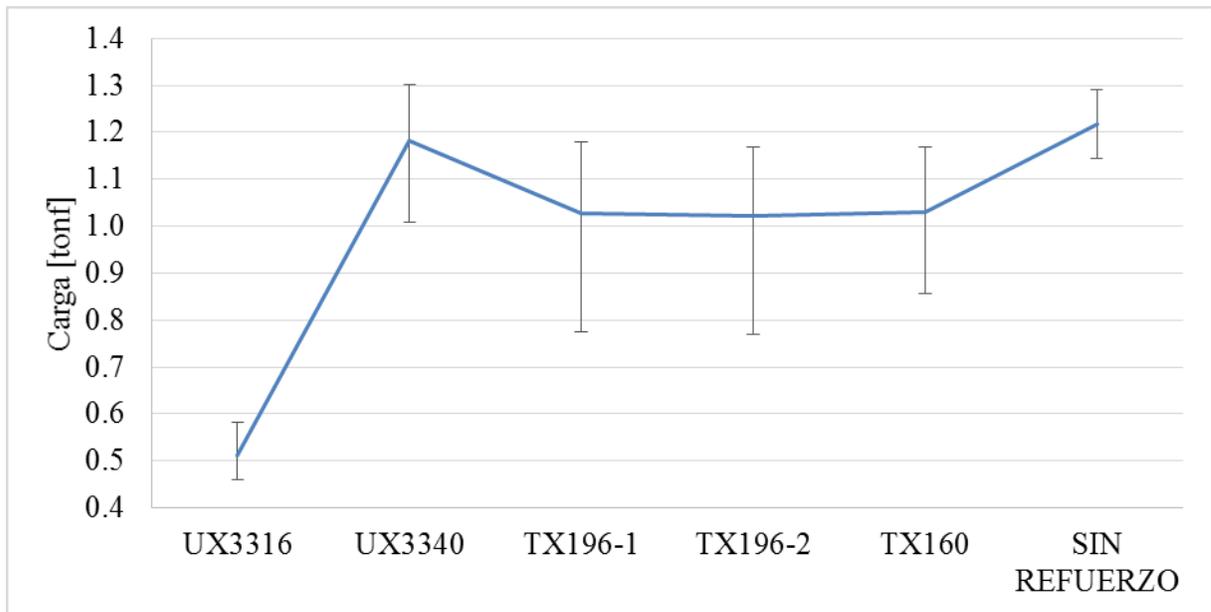


Figura 3-2: Peak de carga datos experimentales disco de shotcrete reforzado.

En el Figura 3-3 se muestra el rango de variación de la deflexión alcanzada en el peak de carga de cada ensayo. En éste, se observa que para el disco de shotcrete sin refuerzo, la deflexión a la cual ocurre el peak de carga, resulta ser un 27% mayor que el promedio del resto de mallas geosintéticas las que se mantiene relativamente constante con un valor de 1.22 [mm].

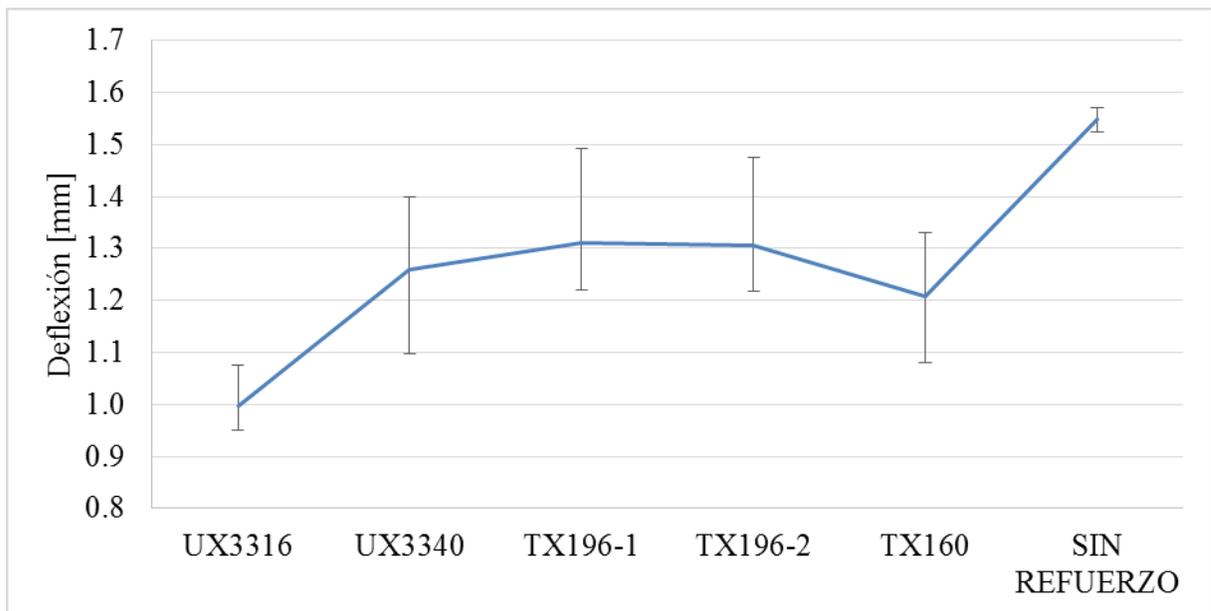


Figura 3-3: Deflexión en el peak de carga de datos experimentales disco de shotcrete reforzado.

3.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Considerando lo observado en la Figura 3-2 y Figura 3-3, el rango lineal de comportamiento del shotcrete resulta ser independiente del tipo de malla utilizado como refuerzo, destacándose la importancia de las propiedades lineales del shotcrete. De acuerdo a lo anterior, resulta necesario obtener el módulo de elasticidad de este material. Para esto, se calculará este valor a partir de los datos experimentales y parámetros propios de la geometría y material, a través de la relación establecida por la Ecuación 3-1 (Bassali, 1957).

$$\delta = \frac{3F}{2\pi h^3} \frac{1-\nu^2}{E} R^2 B(\nu) \quad (3-1)$$

$$B(\nu) = \frac{4}{(1-\nu)(3+\nu)} \left(2 \ln 3 - \frac{\pi}{27} (1+\nu)(\pi + 3\sqrt{3}) \right) + \frac{(\nu-1)^2}{2(3+\nu)(1+\nu)} \quad (3-2)$$

En las expresiones, δ es el desplazamiento en el centro del disco, F es la carga aplicada, h corresponde al espesor del disco, ν el coeficiente de Poisson y R es el radio de la circunferencia comprendida hasta los apoyos.

A partir de los datos experimentales, se construye la Tabla 3-2 de Ensayo- Módulo de Elasticidad, calculado a través de la Ecuación 3-1 (Bassali, 1957) utilizando las dimensiones de los discos de shotcrete ensayados y un módulo de Poisson de 0.18, suponiendo este valor en base al concreto.

Tabla 3-2: Módulo de Elasticidad Ensayos.

Ensayo [-]	Refuerzo [-]	Espesor [mm]	Módulo de Elasticidad [GPa]
1	UX3316	80	1.376
2	UX3316	80	1.458
3	UX3316	80	1.562
1	UX3340	80	1.996
2	UX3340	80	2.079
3	UX3340	80	2.077
1	TX196	80	2.229
2	TX196	80	1.247
3	TX196	80	2.183
1	TX196	80	2.183
2	TX196	80	1.252
3	TX196	80	2.202
1	TX160	80	1.948
2	TX160	80	1.786
3	TX160	80	1.835
1	SIN REFUERZO	60	4.399
2	SIN REFUERZO	60	4.293
3	SIN REFUERZO	80	1.437
1	SIN REFUERZO	80	1.748

De la Tabla 3-2 se extrae que los valores del módulo de Young para el disco de Shotcrete con espesor 80 [mm] varían entre los 1200 y 2300 [MPa], aumentando para discos de espesor 60 [mm] sin refuerzo, obteniendo un valor promedio de 4300 [MPa], o un aumento del 60% con respecto a los ensayos de mayor espesor. La variación del módulo de Young de los discos de 80 [mm] de espesor puede deberse a factores tales como; confección de la probeta y calidad de los materiales de la mezcla. Una discusión del módulo de elasticidad del shotcrete se encuentra en el CAPITULO 5.

En el Figura 3-4 se muestra la variación del módulo de elasticidad para cada ensayo. En esta se observa un valor promedio de 1874 [MPa] para las mallas geosintéticas triaxiales, un 17.7 [%] mayor que el disco sin refuerzo. En cuanto a las geomallas uniaxiales, el módulo de elasticidad tiene una variación de un 1465 a 2050 [MPa] y solo se cuenta con dos ensayos, por lo que no es posible obtener un comportamiento claro.

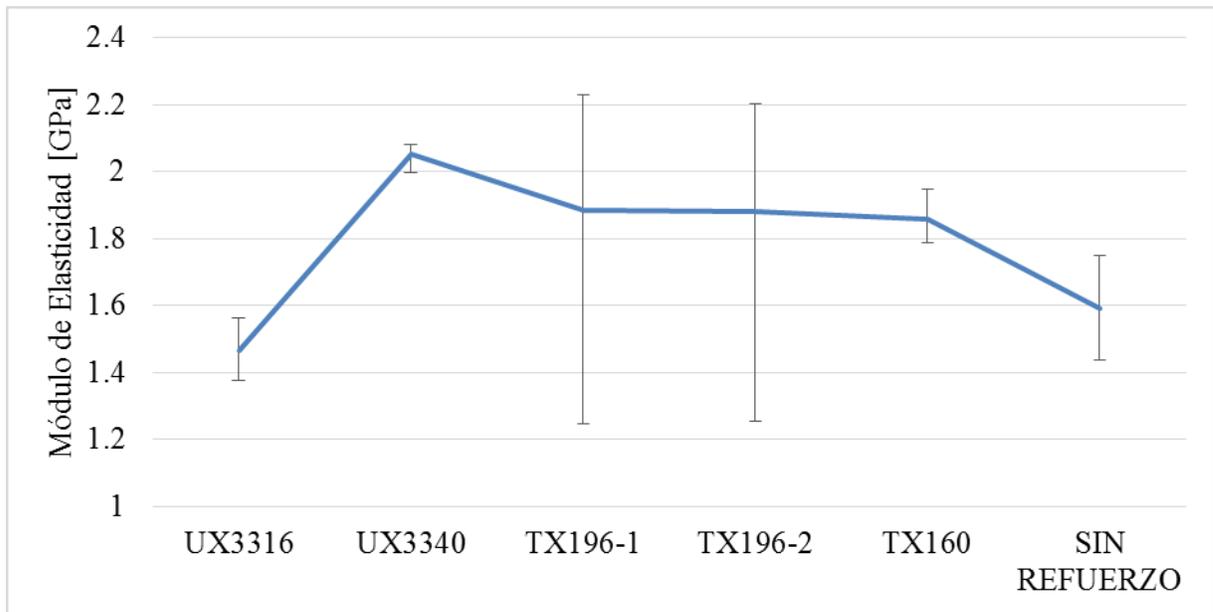


Figura 3-4: Módulo de elasticidad de datos experimentales disco de shotcrete reforzado.

3.3. COMPARACIÓN ENTRE PENDIENTE INICIAL Y POST-PEAK

Una vez ocurrido el agrietamiento del disco de shotcrete, la pendiente de la curva carga vs deflexión representa la rigidez del disco reforzado cuando el refuerzo se encuentra en el rango lineal. Para la determinación de este valor se considera hasta el punto en que la curva carga vs deflexión pierde su linealidad. La Tabla 3-3 muestra este parámetro para las geomallas involucradas en este estudio, además de una comparación con la pendiente inicial.

Tabla 3-3: Pendientes post-peak de carga de la curva carga vs deflexión para ensayos de discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.

Ensayo [-]	Refuerzo [-]	Pendiente post-peak de carga [tonf/mm]	Pendiente Inicial [tonf/mm]	Reducción de pendientes [%]
1	UX3316	0.0129	0.933002	99
2	UX3316	0.0092	0.766176	99
3	UX3316	0.0172	0.758152	98
1	UX3340	0.0478	0.920572	95
2	UX3340	0.0171	0.516107	97
3	UX3340	0.0200	0.872240	98
1	TX196	0.0142	0.931474	98
2	TX196	0.0187	0.500330	96
3	TX196	0.0207	0.882775	98
1	TX196	0.0151	0.990099	98
2	TX196	0.0170	0.886981	98
3	TX196	0.0211	0.998456	98
1	TX160	0.0465	0.450926	90
2	TX160	0.0176	0.466460	96
3	TX160	0.0179	0.533457	97

La reducción de pendiente observada en los datos experimentales (Figura 3-5) se mantiene relativamente constante para los ensayos de discos de shotcrete reforzados con geomallas UX3316, UX3340 y TX196. Una notoria diferencia se presenta para el disco con refuerzo TX160, con un 94% respecto de la pendiente lineal.

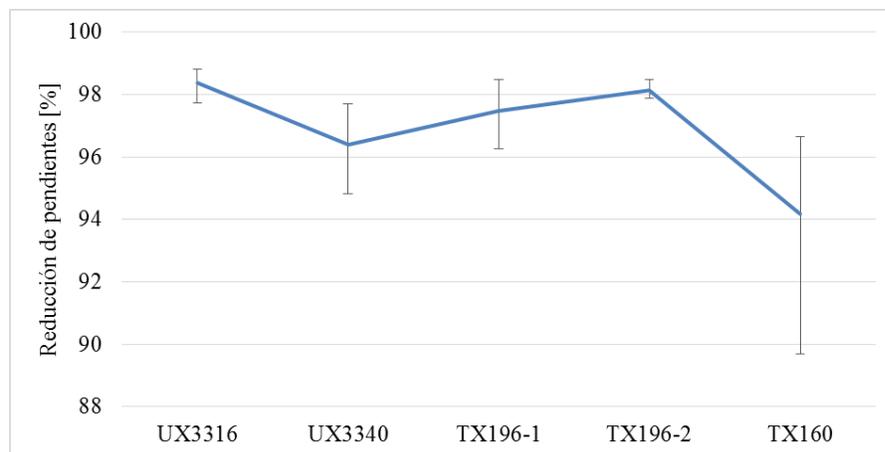


Figura 3-5: Reducción de pendientes de curva carga vs deflexión para ensayos de discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.

3.4. ENERGÍA DE DEFORMACIÓN

El ensayo determina la rigidez del shotcrete reforzado expresado a través de la energía absorbida (ASTM C1550-12), la cual se obtiene como el área bajo la curva carga – deflexión desde la aplicación de la carga hasta una determinada deflexión central. En la siguiente tabla se muestra la energía absorbida por los distintos ensayos analizados en este trabajo hasta los 40 [mm] de deflexión.

Tabla 3-4: Energía Absorbida Ensayos ASTM C1550-12.

Ensayo [-]	Refuerzo [-]	Energía Absorbida [J]
1	UX3316	117.951
2	UX3316	124.727
3	UX3316	111.965
1	UX3340	217.426
2	UX3340	288.240
3	UX3340	231.937
1	TX19644122	189.948
2	TX19644122	242.241
3	TX19644122	190.429
1	TX196	195.143
2	TX196	239.685
3	TX196	193.790
1	TX160	195.148
2	TX160	186.677
3	TX160	194.133
1	SIN REFUERZO*	13.777
2	SIN REFUERZO*	13.777
3	SIN REFUERZO*	14.476
1	SIN REFUERZO*	18.696

(*) Hasta la rotura

De la Tabla 3-4 se percibe el rol que toma la malla de refuerzo al comparar la energía absorbida de los ensayos realizados con geogrillas en relación a los discos sin refuerzo, estableciendo un aumento de hasta 14 veces en energía.

La Figura 3-6 muestra la energía absorbida resultante de los ensayos realizados en el laboratorio de sólidos, a discos de shotcrete reforzados con mallas sintéticas y metálica. Se grafican las curvas de energía acumulada en función de la deflexión en el centro del disco.

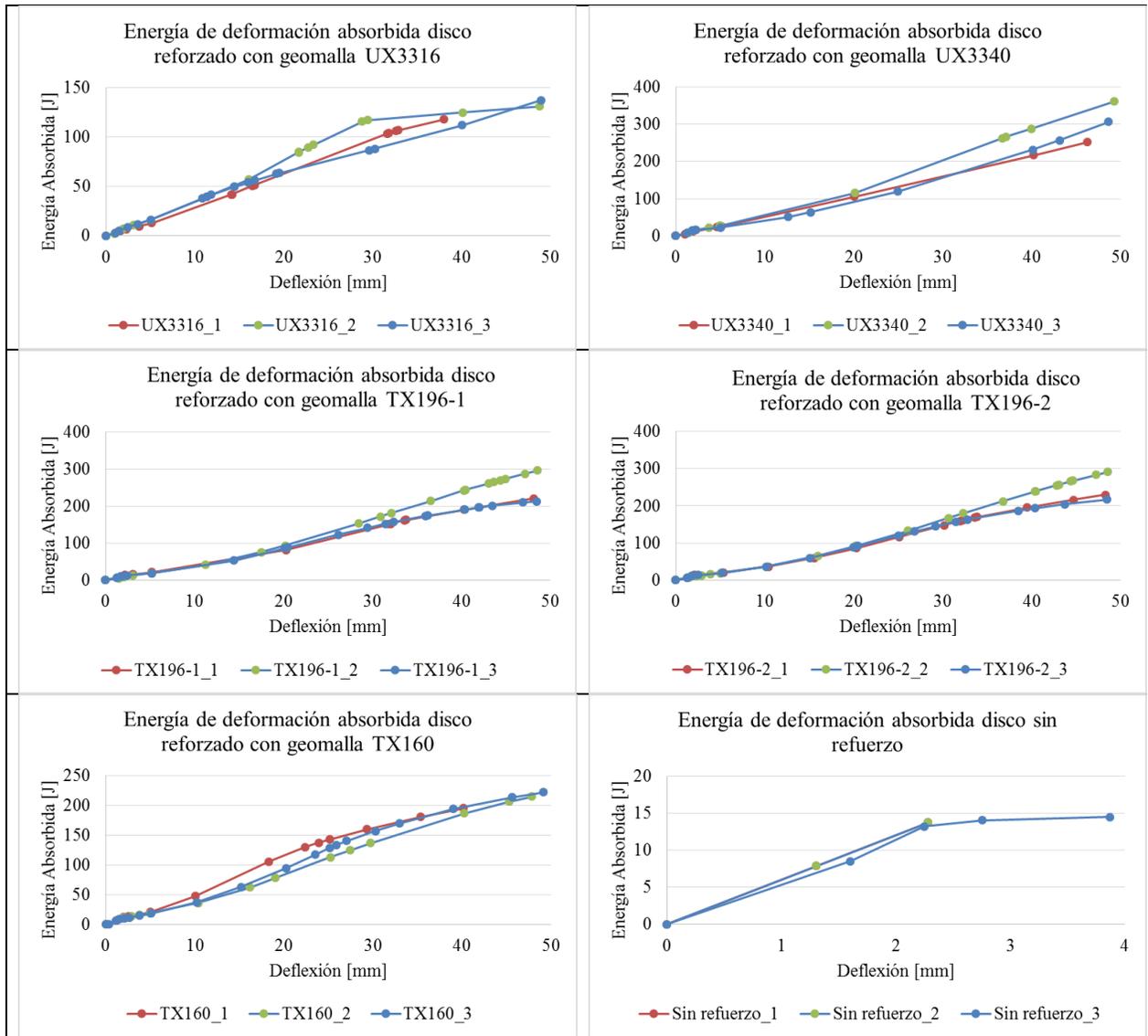


Figura 3-6: Energías de deformación absorbida obtenidas de datos experimentales de ensayo ASTM C1550-12.

CAPITULO 4. MODELAMIENTO EN BASE A ELEMENTOS FINITOS – MODELO WORKBENCH APDL

4.1. GENERALIDADES MODELACIÓN

4.1.1. MARCO TEORICO

El shotcrete, tal como el concreto presenta una alta capacidad a la compresión, pero baja capacidad a la tracción, del orden de un 10% de la capacidad a compresión. Es por esto que la ley constitutiva del material no puede ser modelada a través de un modelo lineal elástico perfecto. El programa de elementos finitos ANSYS incorpora el elemento Solid65 (Figura 4-1), especialmente diseñado para modelar materiales de naturaleza granular como el suelo y el hormigón. Además, diversas investigaciones (Dahamani, 2007; Vasudevan, 2013; Thomas, 2006; Baetu, 2011) lo han considerado como el único elemento capaz de representar las características de este material.

Por lo mencionado anteriormente, se decidió utilizar el elemento Solid65, que tiene la capacidad de representar el comportamiento del concreto, estableciendo una capacidad a la tracción distinta a la compresión. Además, permite modelar sólidos con o sin barras de refuerzo para poder representar el comportamiento del concreto reforzado. Por otro lado, también es posible modelar las fibras que se utilizar como refuerzo en el concreto.

El elemento es definido por ocho nodos con tres grados de libertad cada nodo, los desplazamientos en X, Y y Z (Figura 4-1).

La característica más relevante del elemento Solid65 es la forma de abordar la no-linealidad en las propiedades del material, incorporando al concreto la capacidad de agrietarse en tracción, aplastarse en compresión y presentar “creep” o deformaciones ante cargas constantes a lo largo del tiempo bajo carga sostenida. Además, el elemento considera que las barras de refuerzo a su vez son capaces de experimentar tracción y compresión, pero no corte, además de sufrir deformaciones plásticas y creep.

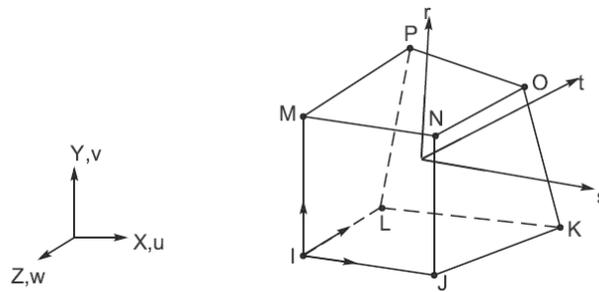


Figura 4-1: SOLID65 3-D Solido de Concreto Reforzado (Theory References ANSYS 14.5).

Este elemento es definido por propiedades de un material isotrópico, se compone de un material sólido y hasta tres materiales independientes de barras de refuerzo.

El elemento presenta ciertas suposiciones y restricciones, las cuales son listadas a continuación (Theory Reference ANSYS 14.5):

- El agrietamiento está permitido en tres direcciones ortogonales para cada punto de integración.
- Si el agrietamiento ocurre en un punto de integración, el agrietamiento es modelado como un ajuste de las propiedades del material, tratando el agrietamiento como una banda de grieta, en lugar de grietas discretas.
- El material concreto se asume inicialmente isotrópico.
- Siempre que el material de barras de refuerzo sea utilizado, el refuerzo se asumirá como un material con propiedades equivalentes “tipo-smear” o distribuidas.
- Además del agrietamiento o aplastamiento, el concreto puede someterse a plasticidad, siendo la superficie de falla de Drucker-Prager la más utilizada. En este caso, la plasticidad ocurre antes que el agrietamiento y el aplastamiento.

El elemento es no lineal, ya que es capaz de modelar no linealidades en las propiedades del material y de contactos, por lo que requiere una solución iterativa. Cuando el agrietamiento y el aplastamiento son usados simultáneamente, se debe cuidar de aplicar la carga lentamente para prevenir posibles aplastamientos ficticios del concreto antes de que la transferencia de carga adecuada pueda ocurrir a través del cierre de una grieta. (Theory Reference ANSYS 14.5)

Modelamiento de una grieta: La presencia de una grieta en un punto de integración es representada a través de una modificación de la relación tensión-deformación introduciendo un plano de debilidad en una dirección normal a la superficie de agrietamiento. También, es posible introducir un factor de reducción de la resistencia al corte β_t , para las cargas que induzcan corte o deslizamiento a través del plano de agrietamiento.

En la Figura 4-2, se muestra el comportamiento a tracción del material, cuando se establece un tensión última f_t a una deformación de agrietamiento ϵ^{ck} . También se aprecia el parámetro T_c , un multiplicador para ajustar la relajación de los esfuerzos en tracción. A su vez el parámetro R' actúa como pendiente o módulo secante con descenso controlado para la convergencia de la solución.

De volver a cerrarse las grietas, la totalidad de los esfuerzos normales son transmitidos nuevamente en el plano de agrietamiento pero el corte es reducido por el factor β_c .

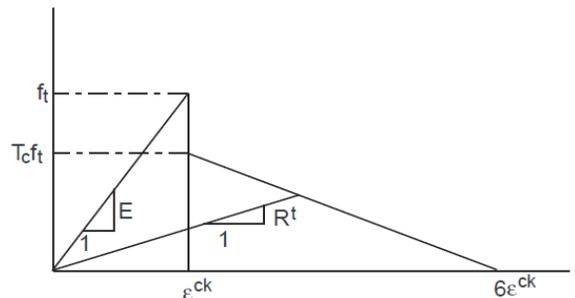


Figura 4-2: Comportamiento a Tracción con condición de agrietamiento (Theory References ANSYS 14.5).

Modelamiento del aplastamiento: Si el material falla en compresión, se asume aplastamiento en ese punto. Para el elemento Solid65, el aplastamiento está definido como un deterioro completo de la integridad estructural del material. Cuando esto ocurre, la resistencia del material es degradada hasta tal punto que su contribución a la rigidez, en el punto de integración, puede ser ignorada.

Constantes: En la Tabla 4-1 se definen las constantes que se deben incorporar al modelo del material concreto.

Tabla 4-1: Constantes modelación elemento Solid 65, Ansys.

Constante	Parámetro	Descripción
C1	β_t	Coeficiente de transferencia de corte para apertura de grieta.
C2	β_c	Coeficiente de transferencia de corte para cierre de grieta.
C3	f_t	Esfuerzo a tracción uniaxial de agrietamiento.
C4	f_c	Esfuerzo a compresión uniaxial de aplastamiento.
C9	-	Multiplicador de rigidez para la condición de tracción de agrietamiento.

Las constantes restantes, C5 a C8, son calculadas en función de las anteriores, a excepción de la constante C9.

Considerando lo anterior, el modelo para el material concreto propuesto, estará definido en un principio por un comportamiento lineal isotrópico. Tendrá este comportamiento hasta que el material falle, por tracción o compresión, dadas por las constantes previamente definidas f_t y f_c respectivamente. En compresión el material se degrada completamente sin aportar rigidez al sistema. Para el caso de falla por tracción, existe la opción para suavizar la falla por medio de las opciones del elemento y la constante C9.

La capacidad que posee el elemento Solid65 para representar el comportamiento no lineal del hormigón queda descrito por la curva mostrada en la Figura 4-3. En tracción, el material sigue el comportamiento dado por la Figura 4-2 alcanzando la capacidad en tracción y luego, decae a cero suavemente. En compresión, es posible ingresar una curva isotrópica con tal de que el material siga una trayectoria no lineal de esfuerzos hasta la rotura, de lo contrario, el software considerará los parámetros lineales hasta la rotura.

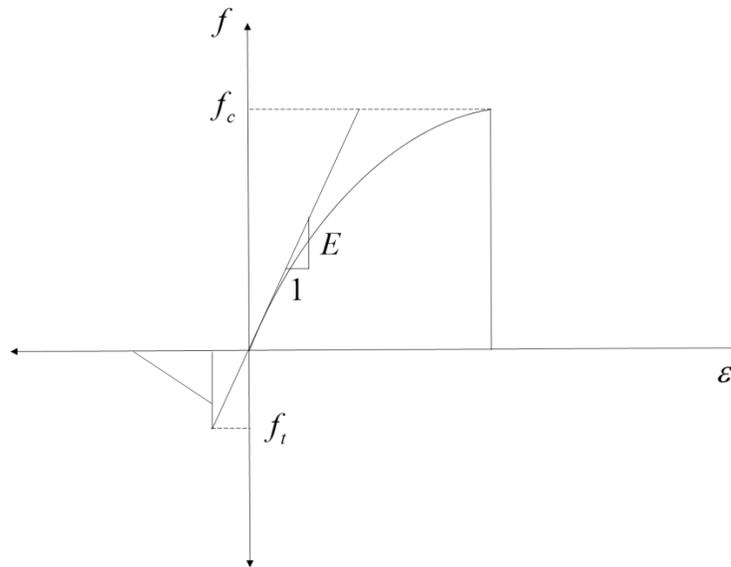


Figura 4-3: Comportamiento no lineal del concreto.

Los parámetros utilizados en el modelo del material y elemento Solid65 se muestran en la Tabla 4-2. Los valores β_t y β_c son ajustados para obtener convergencia de la solución. f_t y f_c se obtienen de parámetros estándar para el concreto.

Tabla 4-2: Parámetros concreto Solid65.

Parámetro	Unidad	Valor
β_t	-	0.2
β_c	-	0.9
f_t	MPa	2.83
f_c	MPa	20.7
T_c	-	0.6

ANÁLISIS ESTRUCTURAL ESTÁTICO

Este análisis es utilizado para determinar desplazamientos, tensiones y deformaciones bajo una carga estática, donde es posible obtener resultados lineales y no lineales. Dichas no linealidades pueden ser inducidas por los contactos, las propiedades del material y por grandes deformaciones

geométricas. En este caso, las no linealidades serán provocadas por las propiedades del material, shotcrete y refuerzos.

4.1.2. GEOMETRÍA

Con el fin de lograr un completo dominio del mallado del disco y no afectar la geometría de éste con las condiciones de borde, es que se incorpora al modelo los cuerpos correspondientes a apoyos y pistón de carga (Figura 4-5 y Figura 4-6). Las dimensiones de estos se basan en lo dispuesto con las especificaciones del ensayo ASTM C1550-04. En la Tabla 4-3 se muestran las dimensiones utilizadas para la confección de la geometría del sistema.

Tabla 4-3: Dimensiones Geometría Modelo Workbench APDL.

Parámetro	Unidad	Valor
Pistón		
Diámetro	mm	100
Espesor	mm	20
Apoyos		
Lado a	mm	80
Lado b	mm	40
Espesor	mm	20
Disco		
Diámetro	mm	800
Espesor	mm	80

El disco tendrá una configuración compuesta por 3 cuerpos, que representarán el Shotcrete y la zona de refuerzo. Dicho esto, el sistema tendrá la forma que se muestra en la Figura 4-4.

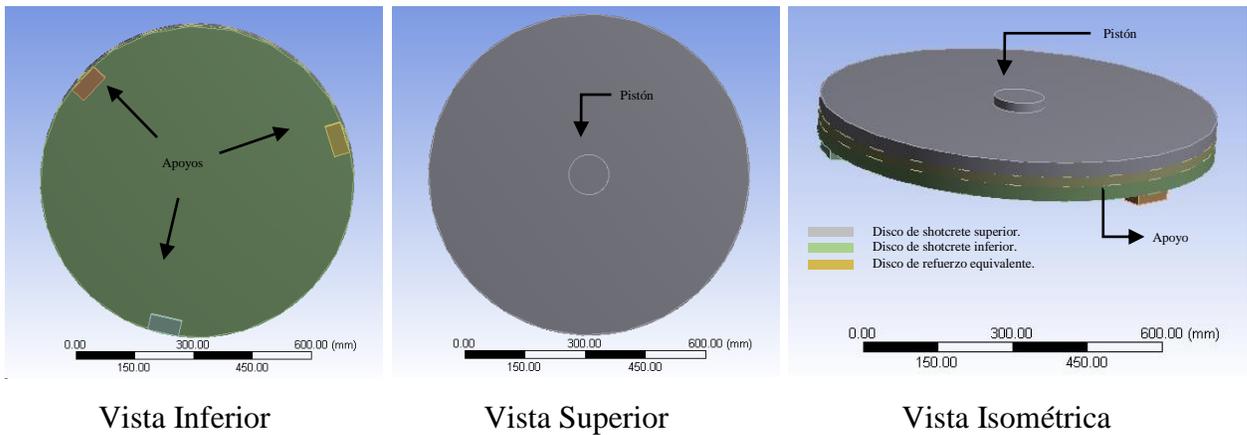


Figura 4-4: Geometría Modelo Workbench APDL.

4.1.3. CONDICIONES DE BORDE

APOYOS

Se establecen apoyos del tipo “Desplazamiento Remoto” incorporado en ANSYS, el cual permite restringir giros y desplazamiento en cualquiera de las direcciones del sistema de coordenadas utilizado. En este caso se han restringido los desplazamientos y rotación en torno al eje perpendicular al centro del disco. De este modo los apoyos tienen la libertad de girar de acuerdo a la deformación del disco. Esta condición se aplica en el centro geométrico de la cara basal de cada apoyo, por medio de la creación de “Puntos Remotos”. Esta configuración representará un apoyo simple, representando las características del ensayo.

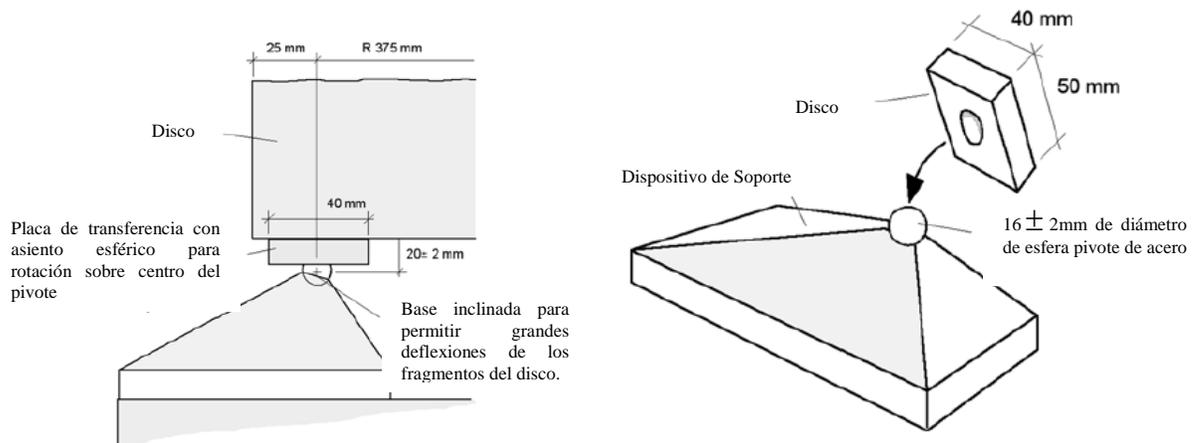


Figura 4-5: Sistema de apoyo ensayo (ASTM C1550-12).

DESPLAZAMIENTO

El ensayo es controlado por el desplazamiento impuesto en el centro del disco a velocidad constante, y es aplicado a través de un pistón con dimensiones mostradas en la Figura 4-6. Se ha modelado el pistón de carga obviando la semiesfera inferior, debido a que una superficie de este tipo genera inestabilidades en el sistema, dificultando la convergencia de la solución.

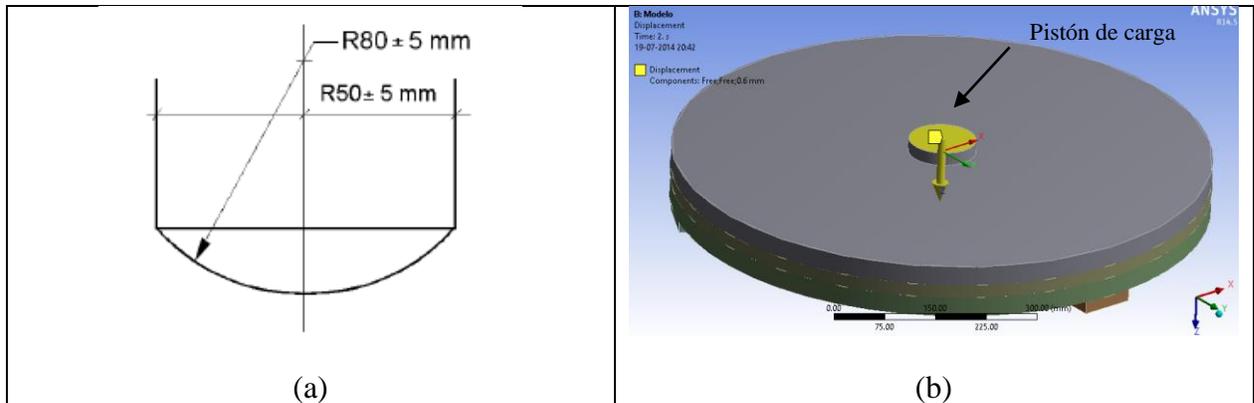


Figura 4-6: (a) Dimensiones pistón de carga (ASTM C1550, 2012), (b) Pistón de carga modelo Workbench APDL.

CONTACTOS

El sistema está constituido por 7 cuerpos, tres apoyos, un pistón y el disco, formado por tres cuerpos. Como consecuencia, se induce la creación de contactos entre estos. El software permite establecer diferentes tipos de contactos, entre los cuales se mencionan; soldado, friccional, sin fricción, rugoso y sin separación. A continuación (Tabla 4-4), se describen los tipos de contactos utilizados en la modelación.

Tabla 4-4: Tipos de contactos definidos en modelación disco de shotcrete reforzado ASTM C1550-12.

Contacto	Objetivo	Tipo de contacto
Pistón	Disco de shotcrete superior	Sin fricción
Disco de shotcrete superior	Disco de refuerzo equivalente	Soldado
Disco de refuerzo equivalente	Disco de shotcrete inferior	Soldado
Disco de shotcrete inferior	Apoyo 1	Sin fricción
Disco de shotcrete inferior	Apoyo 2	Sin fricción
Disco de shotcrete inferior	Apoyo 3	Sin fricción

El contacto generado entre el pistón y el disco de shotcrete superior presenta fricción nula, ya que modelos friccionales generan concentraciones de tensiones a grandes deformaciones. El mismo criterio se considera para la elección de contactos sin fricción entre los apoyos y el disco de shotcrete inferior. Entre los cuerpos que forman el disco de shotcrete reforzado, se eligen contactos del tipo soldado con tal de imponer una compatibilidad perfecta de deformaciones ante aumentos de carga.

4.1.4. MALLADO

La discretización del disco en su espesor determina la cantidad de elementos que formarán parte del material de refuerzo. Dicho material tendrá propiedades equivalentes a un disco de espesor dado con cierto volumen de refuerzo dentro de un volumen total de concreto. Con el fin de representar el comportamiento de una malla de refuerzo, se ha decidido que el disco de refuerzo equivalente tendrá 2 [mm] de espesor con 1 elementos en el espesor. El resto del disco se discretizará en 10 elementos. Luego se forzará la configuración del modelo para que el tipo de elemento preferido sea hexaédrico y el tamaño máximo de cada elemento no sobrepase los 8 [mm] de arista para el disco de 80 [mm] de espesor, como se muestra en la Figura 4-7. Los elementos utilizados corresponden a tetraedros y hexaedros, con preferencia estos últimos.

Las propiedades del material compuesto, son calculadas a través de la regla de las mezclas, esto conlleva una serie de hipótesis, entre las cuales, se encuentra que el material debe comportarse de forma axial con un perfil de deformaciones constante, mayor detalle de las hipótesis y formulación del material compuesto se encuentra en Capítulo 4.3. Por esto, a mayor espesor de esta capa, mayor es el error en el cálculo de las propiedades del refuerzo equivalente.

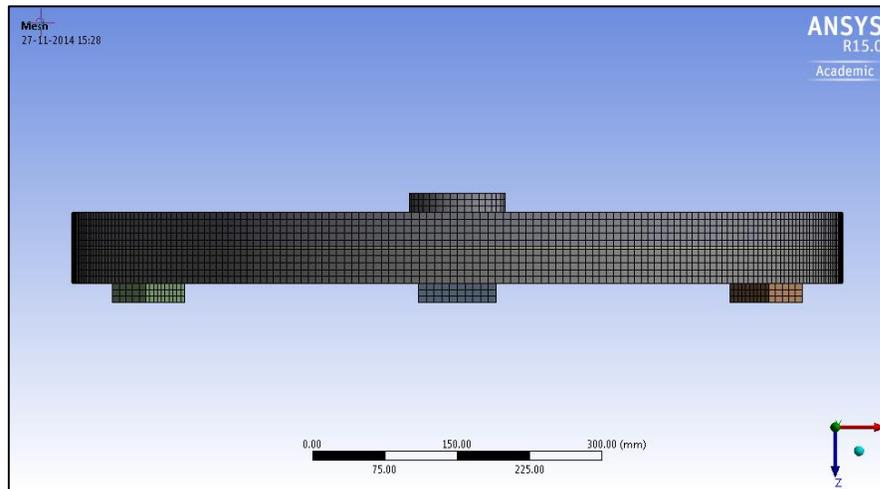


Figura 4-7: Mallado Disco de shotcrete reforzado - vista lateral.

4.2. MODELO DE DISCO DE SHOTCRETE SIN REFUERZO

4.2.1. MODELO LINEAL

Con tal de establecer el error que se comete al considerar una ley constitutiva lineal simétrica para representar el comportamiento del shotcrete, se confecciona un modelo con las propiedades correspondientes.

4.2.1.1. CONFIGURACIÓN MODELO

Se establece una ley constitutiva lineal elástica, simétrica en comportamiento a compresión y a tracción sin límite de carga o desplazamiento. De acuerdo a los ensayos realizados y al análisis del CAPITULO 3, el módulo de elasticidad corresponde a 1592 [MPa] y módulo de poisson 0.18. En la Figura 4-8 se muestra la ley constitutiva del material.

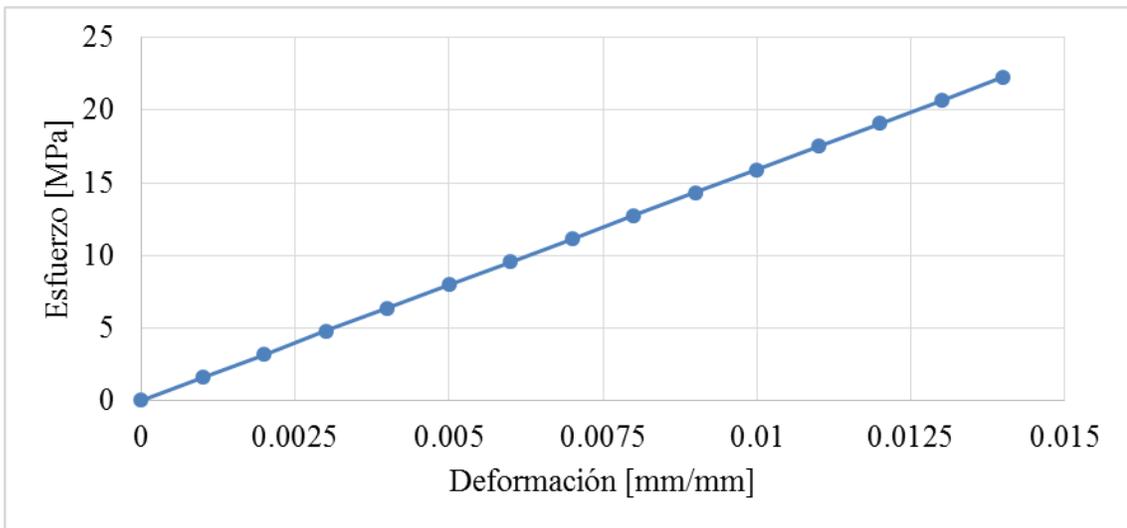


Figura 4-8: Ley constitutiva lineal del shotcrete E=1592 [MPa].

4.2.1.2. RESULTADOS MODELO

Al ingresar parámetros lineales de los materiales, el disco de shotcrete tendrá un comportamiento lineal elástico perfecto. Este efecto se ve reflejado en la curva carga vs deflexión mostrada en la Figura 4-9.

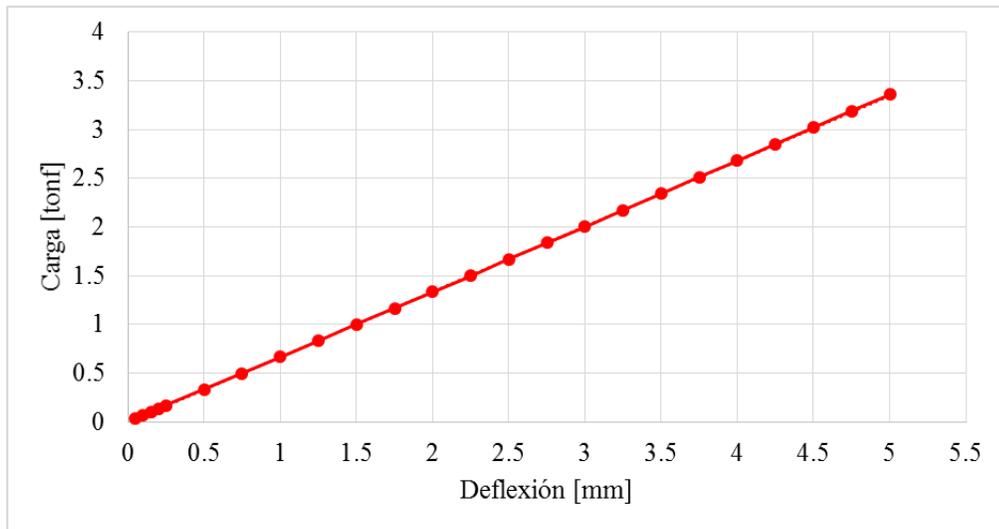


Figura 4-9: Curva carga vs deflexión modelo lineal shotcrete sin refuerzo.

De acuerdo a la Figura 4-9, el disco de shotcrete no reforzado no experimenta fenómenos de agrietamiento ni aplastamiento, dado que el material no sufre daño. Esto se refleja en el comportamiento lineal de esta curva.

4.2.2. MODELO NO LINEAL

CONFIGURACIÓN MODELO

Para este modelo, se activa la función de agrietamiento del hormigón, permitiendo diferenciar el comportamiento a tracción del de compresión, como se muestra en la Figura 4-10. Se establece una tensión de agrietamiento f_t igual a 2.83 [MPa] y un módulo de elasticidad E igual a 1592 [MPa], este último obtenido al aplicar la ecuación (3-2) a los ensayos experimentales para discos de shotcrete sin refuerzo.

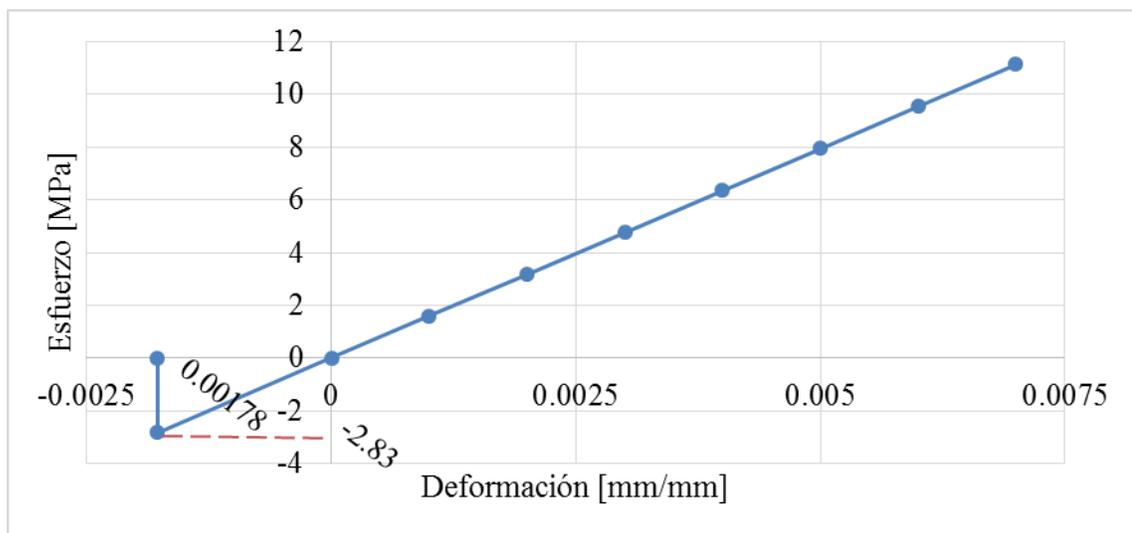


Figura 4-10: Ley constitutiva shotcrete, modelo lineal con agrietamiento E=1592 [MPa]

RESULTADOS DEL MODELO

En la Figura 4-11 se muestra la curva carga en función de la deflexión en el centro del disco, contrastado con el ensayo ASTM C1550-04.

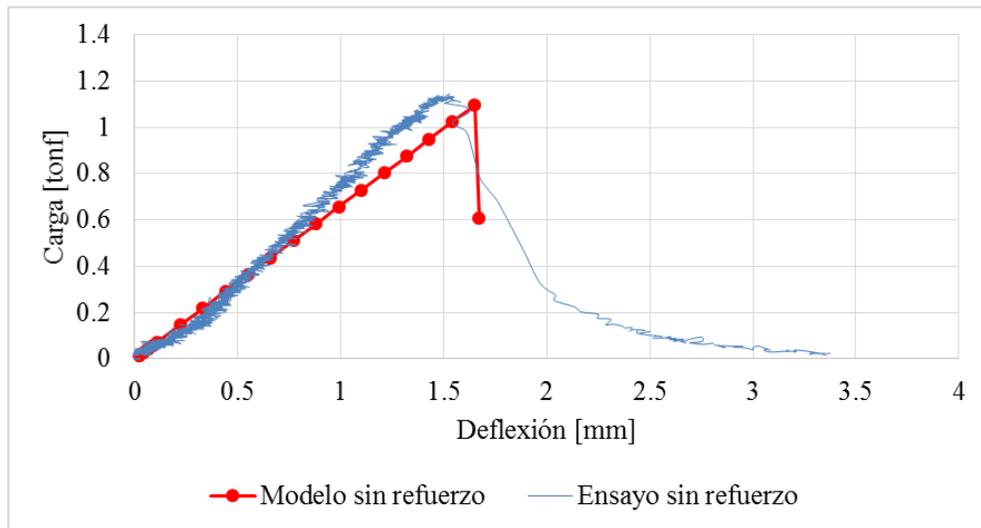


Figura 4-11: Carga vs deflexión disco de shotcrete sin refuerzo $E=1592$ [MPa].

Al ingresar el módulo de elasticidad obtenido de los ensayos experimentales, se obtiene una curva carga deflexión que logra ajustarse a lo rescatado en laboratorio. Este hecho logra validar la modelación en cuanto al rango lineal y punto de falla del comportamiento del shotcrete no reforzado.

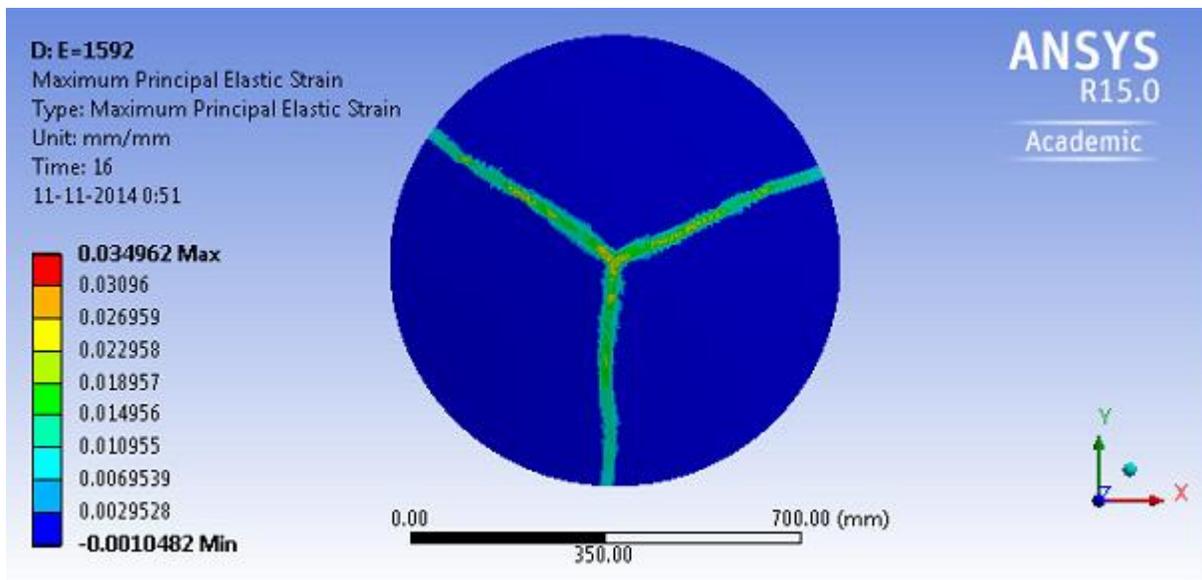


Figura 4-12: Deformaciones elásticas máximas principales, paso posterior al peak de carga, vista inferior disco de shotcrete sin refuerzo.

Para efectos del elemento Solid65, las deformaciones elásticas máximas principales incluyen las deformaciones inducidas por el agrietamiento, lo cual se ve reflejado en la Figura 4-12. Las deformaciones de agrietamiento se concentran en tres franjas separadas en 120° con respecto al eje normal que pasa por el centro del disco (Figura 4-13). Estas representan el sector del disco que ha superado los 0.00178 [mm/mm], deformación a la cual se alcanzan los 2.83 [MPa] en el shotcrete, y por lo tanto, no resiste tracciones (Figura 4-10).

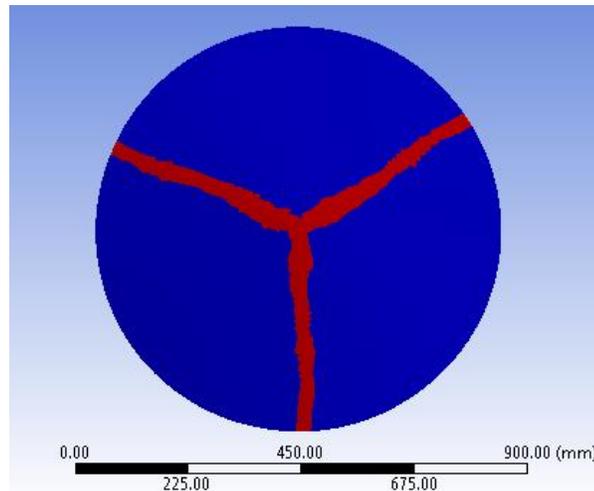


Figura 4-13: Deformaciones de agrietamiento, en rojo – vista inferior disco de shotcrete no reforzado.

Al observar las deformaciones de agrietamiento dentro del espesor del disco de shotcrete (Figura 4-14) se tiene que estas alcanzan a cubrir completamente la zona de refuerzo equivalente (con propiedades de shotcrete sin refuerzo).

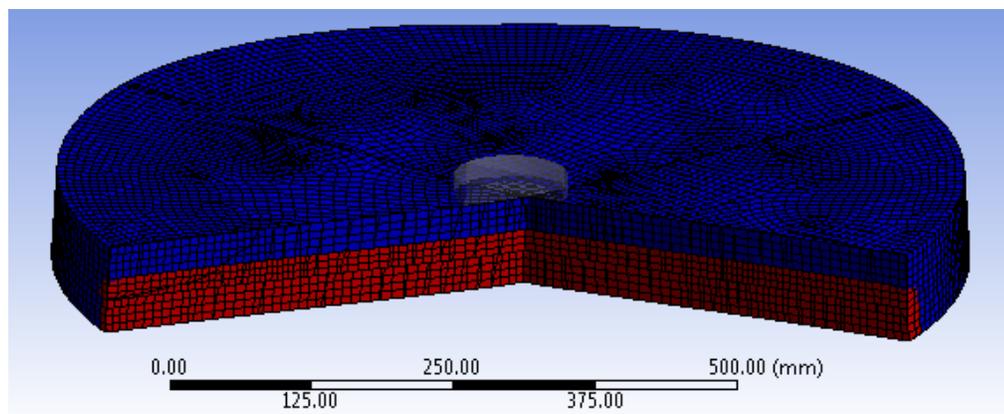


Figura 4-14: Deformaciones de agrietamiento - disco de shotcrete no reforzado.

Finalmente, este modelo verifica el patrón de falla observado en los ensayos de laboratorio, presentando la formación de tres franjas de agrietamiento espaciadas en 120° con respecto al eje que cruza perpendicular al centro del disco (Ver Figura 4-15).

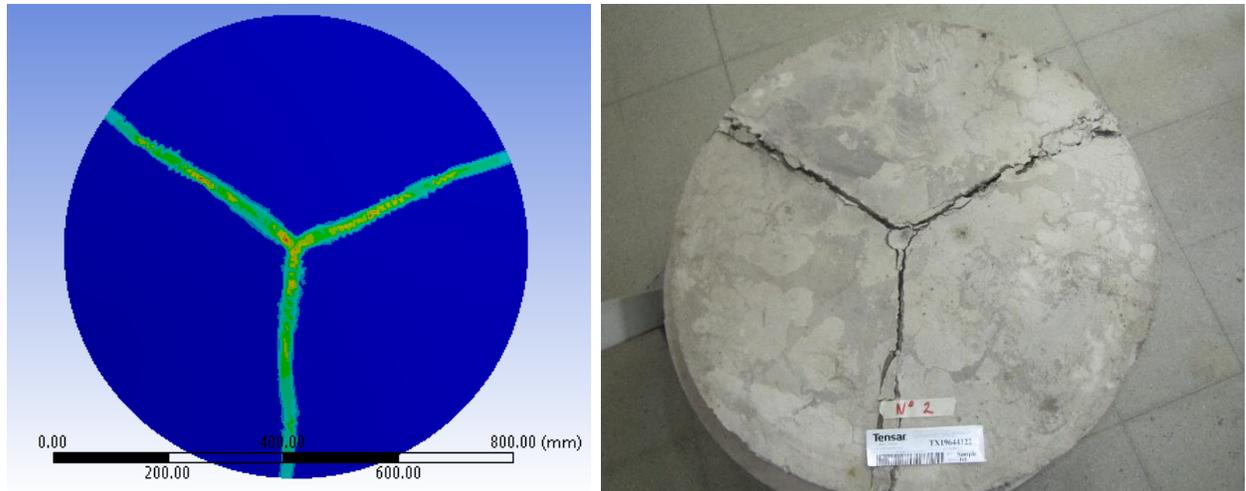


Figura 4-15: Distribución de deformaciones equivalentes, vista inferior disco de shotcrete sin refuerzo - modelo no lineal. Instante posterior al agrietamiento (izquierda). Ensayo experimental investigación Moffat, patrón de falla Ensayo ASTM C1550-04. (derecha)

4.3. MODELO DE DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO

CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para la configuración de este modelo se mantendrá lo impuesto en el modelo no lineal del shotcrete sin refuerzo, agregando los parámetros necesarios para representar el efecto de la malla de refuerzo dentro del disco.

La curva del refuerzo encontrada a través de los ensayos de laboratorio ASTM D6637 será simplificada por un modelo bilineal del material, representada por el módulo de elasticidad y la resistencia a la rotura, tal como se muestra en la Figura 4-16. El objetivo de esta simplificación es establecer parámetros de diseño que puedan ser contrastados con la información suministrada por los fabricantes del refuerzo. Además, esta simplificación conlleva un ahorro de tiempo computacional y no tiene un efecto significativo en los resultados (Tabla 4-5).

Las curvas bilineales de estos refuerzos se encuentran en la sección Anexos.

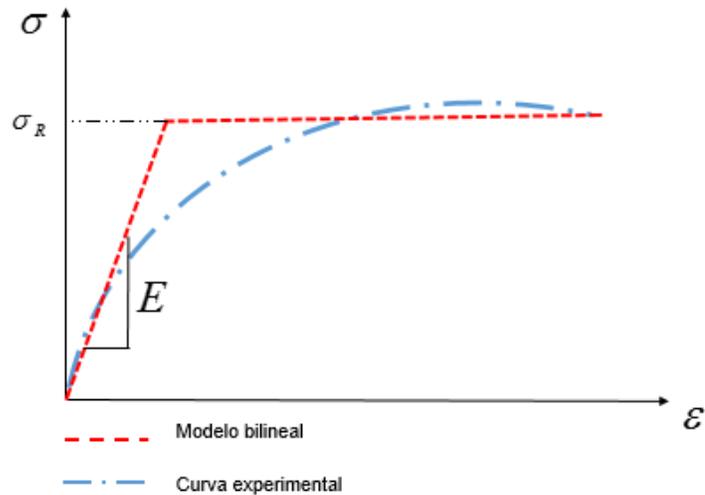


Figura 4-16: Modelo bilineal refuerzo.

En el 0, sección Anexos se encuentra la aplicación de esta simplificación para las mallas de refuerzo consideradas en este estudio. Los parámetros utilizados para la confección del modelo se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Parámetros ley constitutiva bilineal mallas de refuerzo.

Tipo	Código	E [MPa]	σ_{RP}
Malla Metálica	C139	210000.00	500.00
Malla Geosintética	TX160	4839.63	235.28
Malla Geosintética	TX196	4566.80	245.99
Malla Geosintética	UX3340	4064.33	210.26
Malla Geosintética	UX3316	5161.10	232.80

Los parámetros mostrados en la Tabla 4-5, obtenidos a partir de los datos experimentales, son utilizados para la creación de las curvas tensión vs deformación bilineales (Figura 4-17). A continuación, se grafica esta simplificación contrastada con los ensayos realizados a cada geomalla.

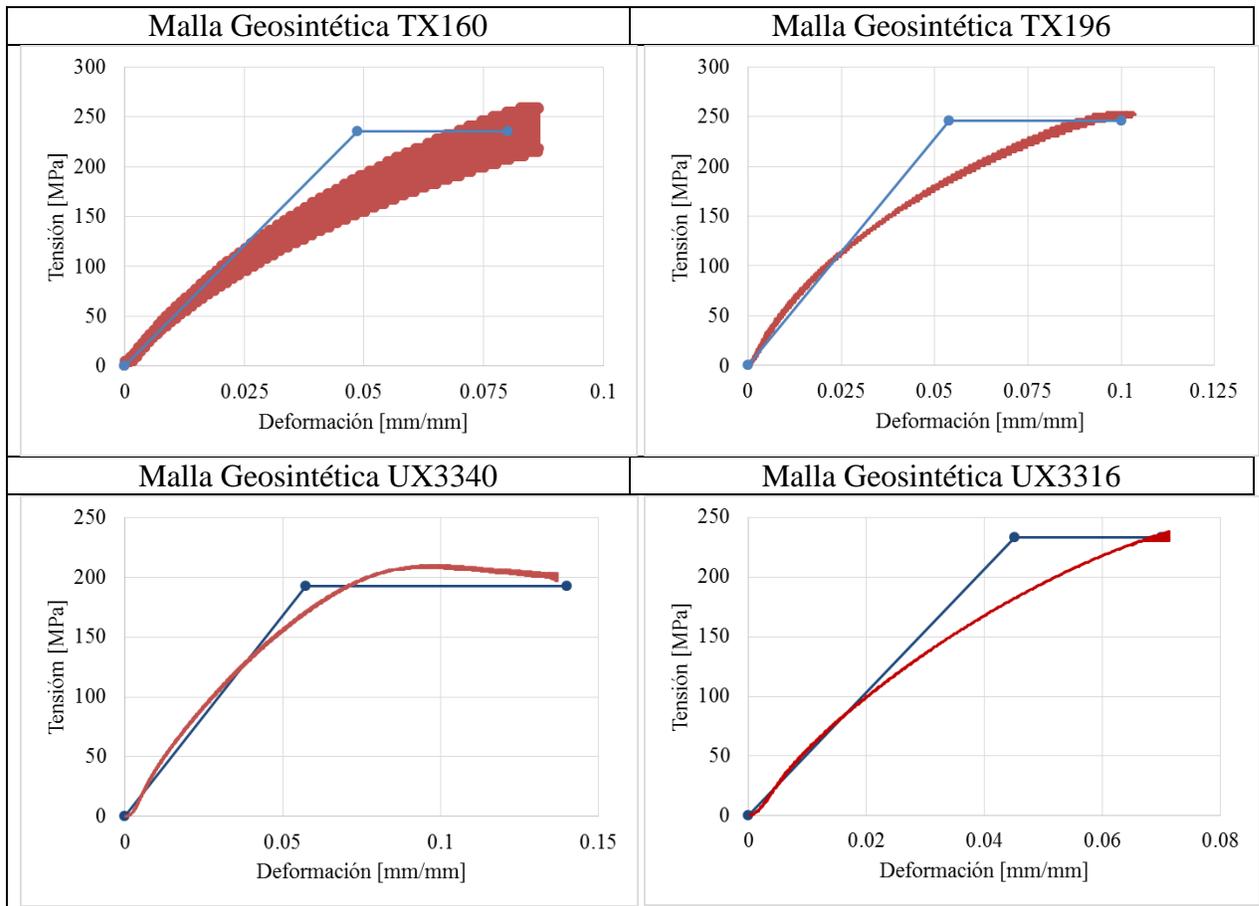


Figura 4-17: Curvas tensión vs deformación bilineales mallas de refuerzo.

La curva tensión deformación bilineal (Figura 4-18) correspondiente a la malla metálica se construye de acuerdo al módulo de elasticidad y tensión de fluencia, descrito en la Tabla 4-5. Esta malla está conformada por barras de 4.2 [mm] de diámetro con 100 [mm] de separación.

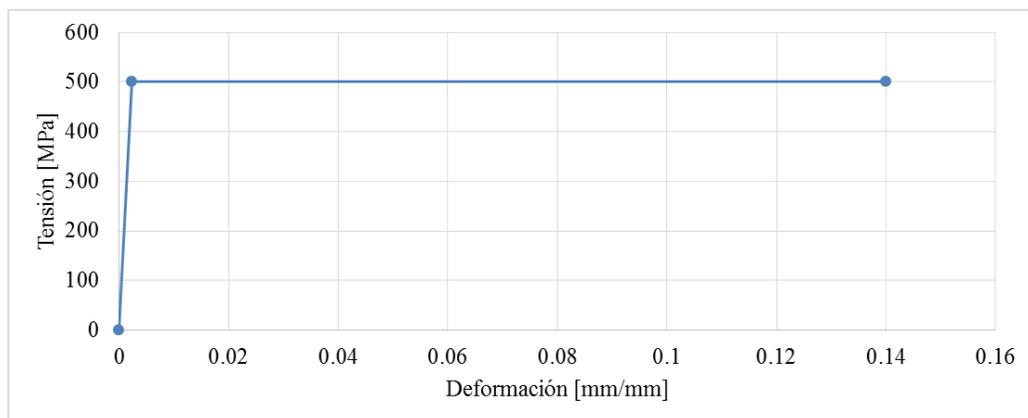


Figura 4-18: Curva tensión vs deformación bilineal malla metálica.

LEY CONSTITUTIVA LINEAL EQUIVALENTE

El disco de refuerzo equivalente tendrá un porcentaje de propiedades tanto del concreto como del refuerzo. La proporción de estos porcentajes dependerá del volumen que ocupa cada uno en este disco equivalente, por ende, se utilizará la “Regla de las mezclas” para determinar el nuevo módulo de elasticidad. (Bryan, 1999).

Asumiendo el estado de tensiones en un elemento diferencial, es posible representar el comportamiento del shotcrete reforzado como un sistema paralelo (Figura 4-19) cargado axialmente. Este modelo asume que los materiales se encuentran perfectamente soldados, con lo que se tendrán deformaciones iguales para cada elemento.

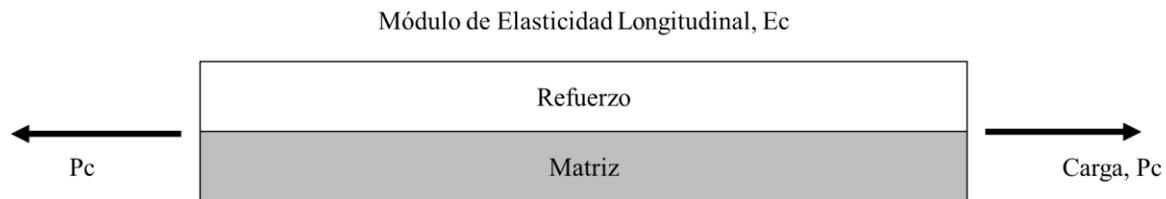


Figura 4-19: Modelo sistema paralelo de compuesto unidireccional, que considera un material de refuerzo y una matriz de shotcrete, aplicando una carga P_c y con un módulo de elasticidad del compuesto E_c .

En la zona de refuerzo equivalente, el shotcrete reforzado tendrá las condiciones exigidas por el modelo cuando el espesor de este disco equivalente sea lo suficientemente bajo. A mayor espesor, mayor será el error en considerar este supuesto, debido a que el perfil de deformaciones no será constante en el espesor del refuerzo. En esta investigación, el modelo considera un espesor de la zona compuesta de 2 [mm].

El módulo de elasticidad del refuerzo y del shotcrete son E_R y E_S respectivamente. El área transversal del refuerzo es A_R y el del shotcrete es A_S , suponiendo que el largo del elemento es L , entonces es posible representar las cantidades de ambos materiales en fracciones de volumen, V_S y V_R cumpliendo que la suma de ambos resulte igual al cien por ciento del compuesto.

El sistema se somete a una carga P_c , la cual es distribuida a ambos materiales, es decir, $P_C = P_R + P_S$. Por otro lado, las deformaciones de estos son iguales, respetándose que $\varepsilon_C = \varepsilon_S = \varepsilon_R$. Dado esto,

y considerando una ley constitutiva lineal para los materiales, es posible expresar el equilibrio de cargas como sigue:

$$\sigma_C \cdot A_C = \sigma_R \cdot A_R + \sigma_S \cdot A_S \quad (4-1)$$

Además, por compatibilidad de deformaciones, dividiendo por la deformación se obtiene:

$$\frac{\sigma_C \cdot A_C}{\varepsilon_C} = \frac{\sigma_R \cdot A_R}{\varepsilon_R} + \frac{\sigma_S \cdot A_S}{\varepsilon_S} \quad (4-2)$$

O igualmente, expresada en función del módulo de elasticidad:

$$E_C = E_R \cdot V_R + E_S \cdot (1 - V_R) \quad (4-3)$$

En la Tabla 4-6 se muestran los valores V_R y V_S , correspondientes a las fracciones de volumen del refuerzo y el shotcrete, respectivamente.

Tabla 4-6: Fracciones de volumen de mallas de refuerzo.

Refuerzo	V_R	V_S
Geomalla triaxial TX196	0.094	0.906
Geomalla triaxial TX160	0.158	0.842
Geomalla uniaxial UX3340	0.622	0.378
Geomalla uniaxial UX3316	0.622	0.378
Malla metálica C139	0.140	0.860

LEY CONSTITUTIVA NO LINEAL EQUIVALENTE

Cuando la curva esfuerzo deformación de los materiales no es lineal, la ecuación 4-3 no es aplicable directamente, para estos efectos, la pendiente de esta curva varía con la deformación. Por esto, se utiliza la “regla de las mezclas” utilizando el módulo tangente C_i^T como propiedad principal del material (Majó y Andreu, 2003). El módulo tangente equivalente se obtiene de acuerdo a la ecuación 4-4

$$C_i^T = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\varepsilon_i} \quad (4-4)$$

Luego se recupera la ecuación constitutiva secante para el material compuesto como sigue:

$$\sigma_i = C_i^T \cdot \varepsilon_i \quad (4-5)$$

Donde σ_i corresponde al estado de tensiones y ε_i a la deformación unitaria.

Entonces, la curva esfuerzo vs deformación del material de refuerzo equivalente estará determinada por tres sectores (Figura 4-20). La pendiente tangente C_{C1} corresponde a la respuesta del sistema cuando ambos materiales se encuentran en la etapa lineal de su ley constitutiva. Cuando la deformación de agrietamiento del shotcrete (ε_{as}) se alcanza, el material deja de aportar rigidez resultando en C_{C2} . Ésta pendiente se mantendrá hasta que el refuerzo ha alcanzado su fluencia, en el modelo bilineal del material. Es importante destacar que se considera que el material de shotcrete al agrietarse, continúa resistiendo la carga correspondiente al instante anterior al agrietamiento. Esto se debe a una limitación del elemento para representar una caída en la ley constitutiva.

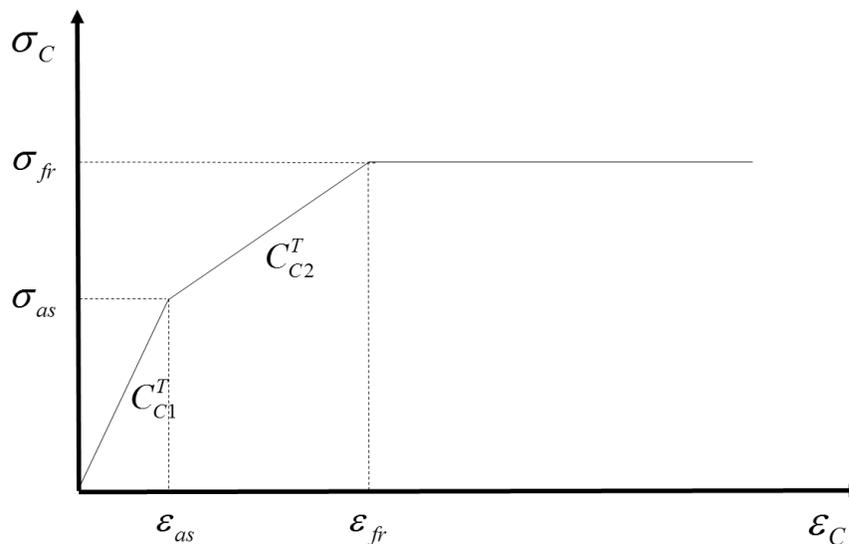


Figura 4-20: Ley constitutiva material compuesto, refuerzo equivalente.

La Tabla 4-7 muestra el valor de las pendientes C_{C1} y C_{C2} , la deformación de agrietamiento del shotcrete ε_{as} y la tensión de rotura del refuerzo σ_{fr} , parámetros que definen el comportamiento del material de refuerzo equivalente (Figura 4-10).

Tabla 4-7: Parámetros ley constitutiva material de refuerzo equivalente en disco de 2 [mm].

Refuerzo	C_{C1} [MPa]	C_{C2} [MPa]	σ_{fr} [MPa]
Geomalla triaxial TX196	1871.379	428.893	3.327
Geomalla triaxial TX160	2104.308	763.444	3.741
Geomalla uniaxial UX3340	2691.703	2089.927	4.785
Geomalla uniaxial UX3316	3811.980	3210.204	6.776
Malla metálica C139	30845.446	29476.909	72.619

Los valores anteriores se muestran en la Figura 4-21, construyendo una curva donde se distinguen tres segmentos lineales; el primero representa el comportamiento del material compuesto mientras ambos se encuentren en su etapa elástica, el segundo comienza con el agrietamiento del shotcrete y termina con la máxima tensión alcanzada por el refuerzo, en el último tramo ambos materiales dejan de aportar rigidez al sistema.

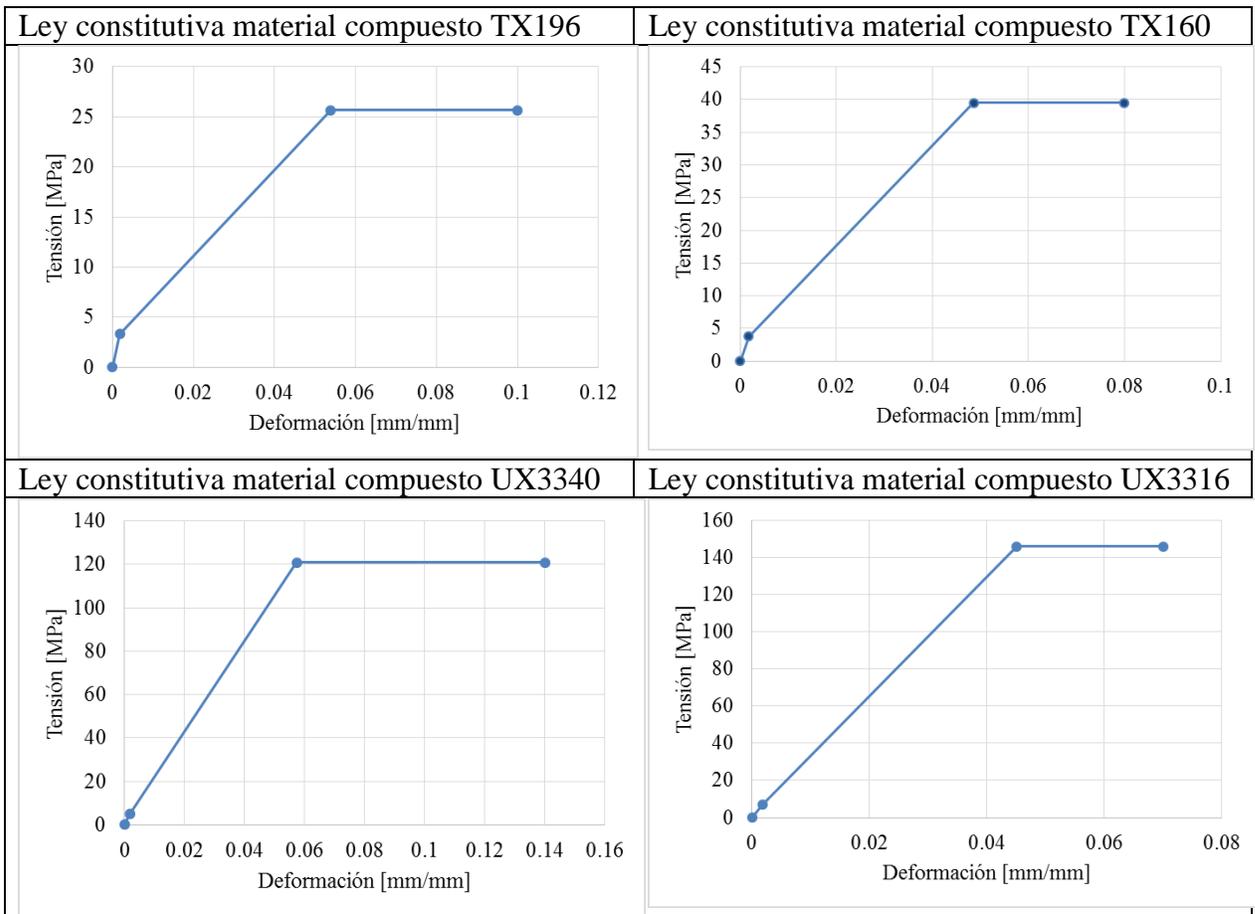


Figura 4-21: Ley constitutiva materiales compuestos, refuerzos geosintéticos equivalentes en un disco de espesor 2 [mm].

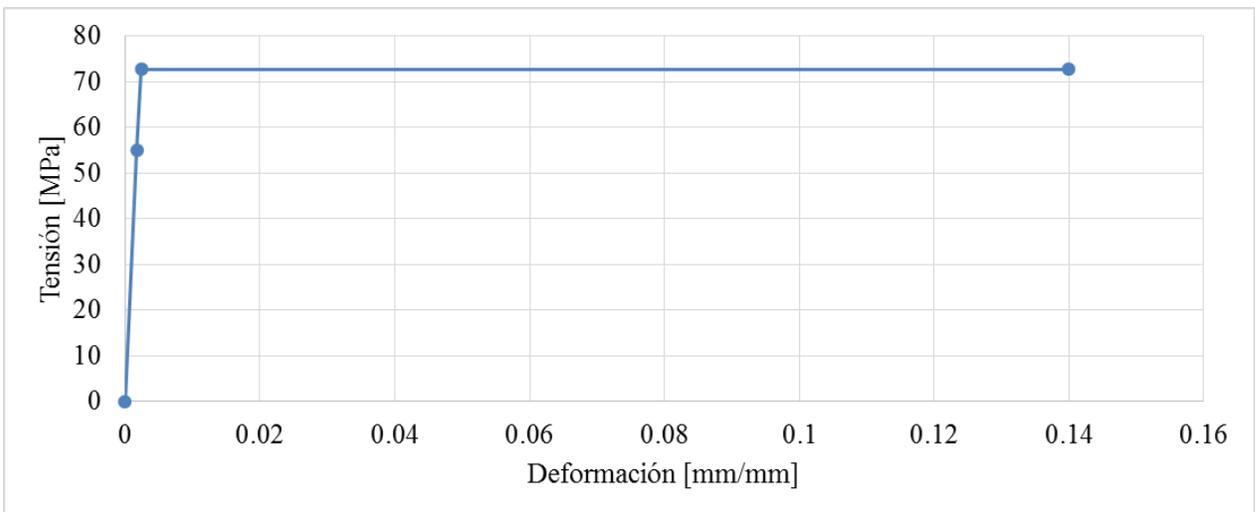


Figura 4-22: Ley constitutiva materiales compuestos, refuerzo malla metálica equivalente en un disco de espesor 2 [mm].

Las curvas mostradas en la Figura 4-21 muestran una deformación última para cada refuerzo. Esta deformación no representa una rotura en el material, tal como sucede en los ensayos, de hecho, corresponde al último punto definido por la curva multi-lineal. De superar este valor, se considera el supuesto de que el material de refuerzo equivalente mantiene la carga, lo que significa una limitación al no representar el fallo del material.

4.3.1. RESULTADOS MODELO DISCO SHOTCRETE REFORZADO CON MALLA – CURVA CARGA VS DEFLEXIÓN

La curva carga vs deflexión resulta de gran interés en esta investigación debido a que se obtiene directamente del ensayo ASTM C1550-12, pudiendo establecer un punto de comparación entre el modelo de elementos finitos y el ensayo de laboratorio. En el modelo, la carga es obtenida como una fuerza de reacción total producto del desplazamiento impuesto en el pistón. Esta fuerza se obtiene mediante la integración de los esfuerzos de cada elemento en el disco. Por otro lado, en el ensayo de laboratorio, la carga resultante será la necesaria para otorgar al disco la deflexión esperada, dada la velocidad del ensayo.

En la sección E de anexos, se adjuntan las curvas carga vs deflexión de cada disco de shotcrete reforzado, contrastados con sus respectivos ensayos (Moffat, 2013). A continuación, se muestran los resultados de los modelos de shotcrete reforzado con malla sintética (Figura 4-23).

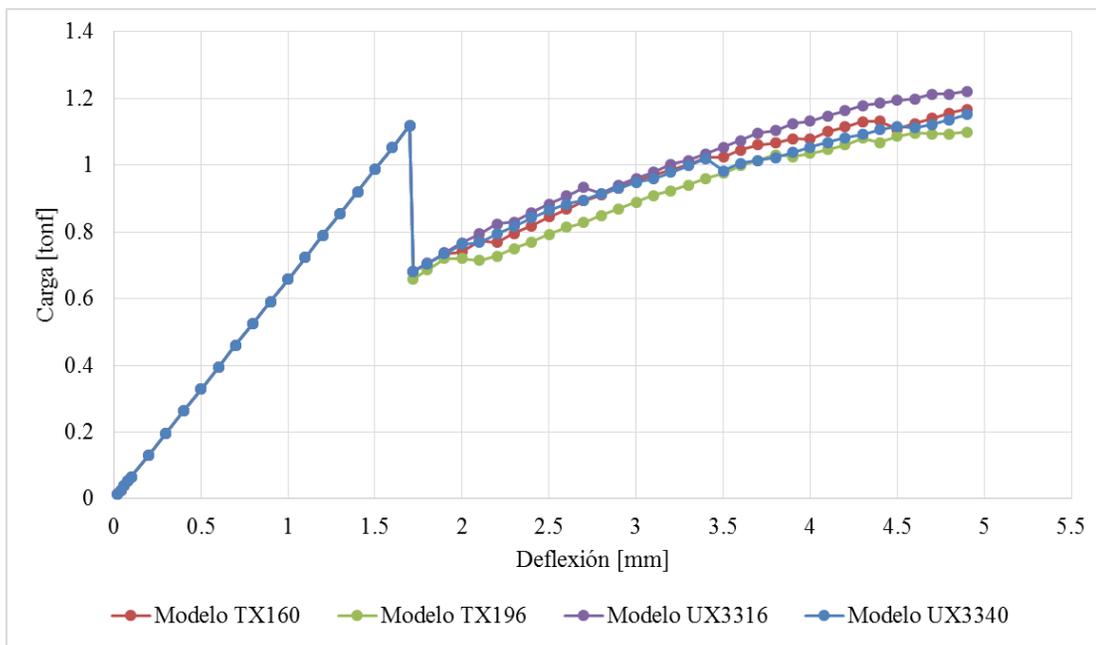


Figura 4-23: Modelación numérica - Carga vs deflexión modelo discos de shotcrete reforzados con geomallas.

Al variar el tipo de malla de refuerzo, están cambiando las propiedades del disco de refuerzo equivalente, lo que induce un cambio en el comportamiento no lineal del disco de shotcrete reforzado (ver Figura 4-23), a partir de la caída de carga. Antes del peak de carga, el refuerzo no afecta la curva carga deflexión, en otras palabras, el rango lineal es controlado completamente por las propiedades del shotcrete; el módulo de elasticidad y su resistencia a la tracción.

Posterior al peak de carga, las curvas con mayor energía de deformación corresponden a las mallas uniaxiales UX3316 y UX3340, tal como se observa en los ensayos de laboratorio (Moffat, 2013). Respecto de las curvas carga deflexión de los discos reforzados con mallas triaxiales, no se aprecian diferencias importantes.

La caída de carga resulta ser independiente del tipo de refuerzo utilizado, indicando que depende únicamente de la fractura del shotcrete. En todos los modelos, el disco se agrieta de la misma forma. En términos cuantitativos (Tabla 4-8) las mallas geosintéticas presentan un promedio de pérdida de carga de 0.372 [tonf] con una variación de 0.01 [tonf]. Para todos los casos el peak de carga se alcanza a los 1.12 [tonf], esto significa que la pérdida de carga representa un 40 % del peak de carga para este tipo de refuerzos.

Las pendientes post-peak de las curvas carga vs deflexión presentan un promedio de 0.308 [tonf/mm] con una variación de 0.014 [tonf/mm]. Una mayor pendiente post-peak indica un aumento en la energía de absorción, traduciéndose en un mejor desempeño de la malla de refuerzo. En base a esto, la geomalla UX3316 destaca en cuanto a su pendiente post peak con un aumento de un 57 [%] en relación a la pendiente en el rango lineal.

Tabla 4-8: Pérdida de carga y pendiente post-peak de curva carga vs deflexión para discos de shotcrete reforzados con mallas geosintéticas.

Refuerzo	Peak de carga [tonf]	Pérdida de carga [tonf]	Pérdida de carga [%]	Pendiente rango lineal [tonf/mm]	Pendiente post peak [tonf/mm]	Pend. Post-peak/Pend. Lineal [%]
TX160	1.119	0.454	41	0.658	0.292	44
TX196	1.119	0.460	41	0.658	0.281	43
UX3340	1.119	0.451	40	0.658	0.295	45
UX3316	1.119	0.455	41	0.658	0.308	47

A continuación se muestran las curvas carga vs deflexión del modelo del disco de shotcrete con capacidad de agrietamiento que considera un espesor de la capa de refuerzo de 2 [mm]. Esta curvas a su vez son comparadas con lo obtenido en los ensayos de laboratorio (Moffat, 2013).

Adicionalmente se presta atención en el peak de carga, deflexión en el peak de carga, pendiente post-peak de carga y energías de deformación absorbidas.

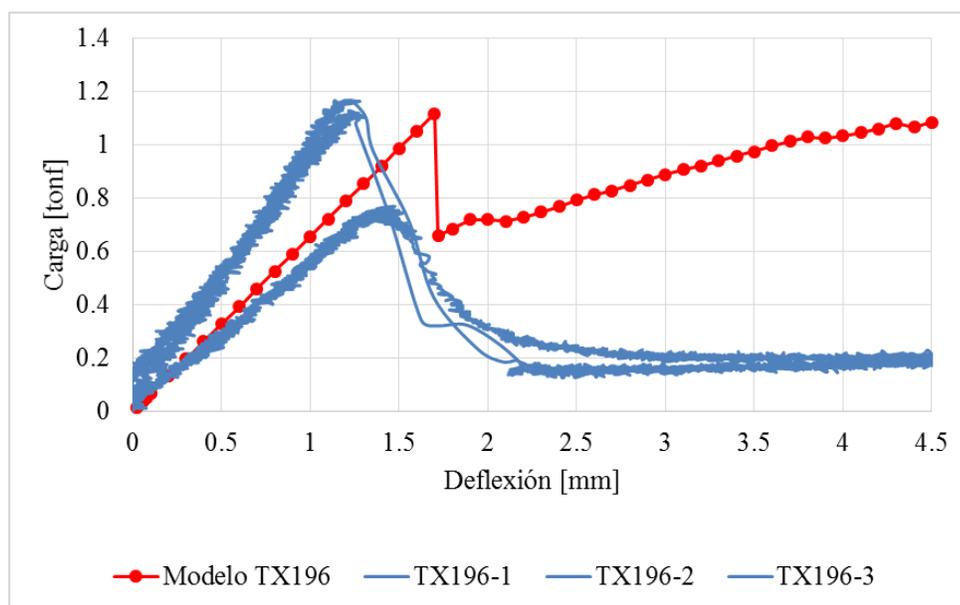


Figura 4-24: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196.

Los resultados de la modelación del disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 (Figura 4-24) muestran que la pendiente inicial se encuentra dentro de los valores observados en los ensayos realizados en laboratorio. Sin embargo, la respuesta del modelo en los rangos lineales se acerca al límite inferior de la pendiente experimental donde el peak de carga se encuentra por debajo del resto de los ensayos en 0.39 [tonf], es decir un 34.5%.

De ajustarse el valor del módulo de elasticidad a los ensayos TX196-1 y TX196-2 el valor será aproximadamente 2.19 [GPa].

El peak de carga observado en los resultados de la modelación se encuentra un 9% mayor que el promedio de los datos experimentales. A su vez, la deflexión en el peak los supera en un 30% (Ver Figura 4-25).

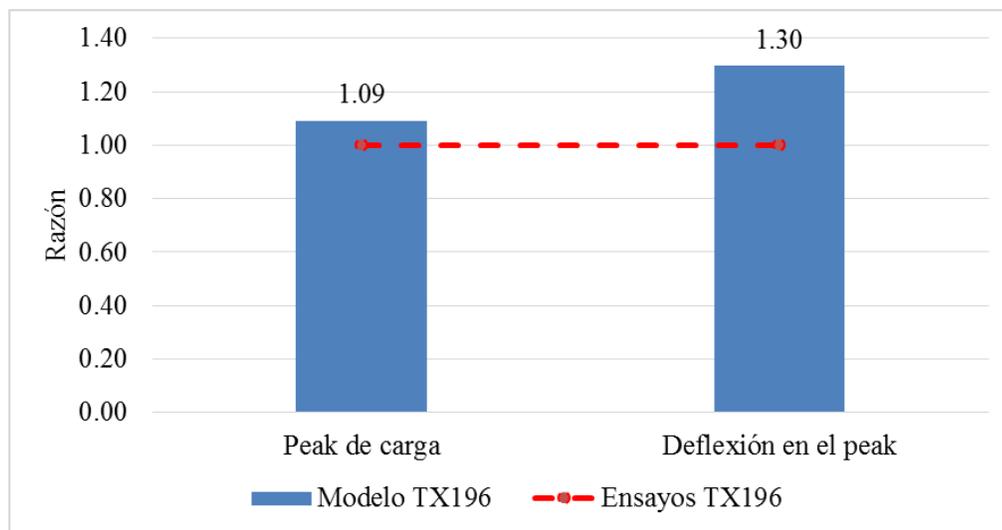


Figura 4-25: Relación entre parámetros obtenidos del modelo TX196 con datos experimentales.

La Figura 4-26 muestra las energías de deformación absorbidas acumuladas por el disco de shotcrete reforzado del modelo TX196, comparado con lo calculado en base a los datos experimentales. De esta se extrae que la energía absorbida supera en 3 veces a los ensayos de laboratorio.

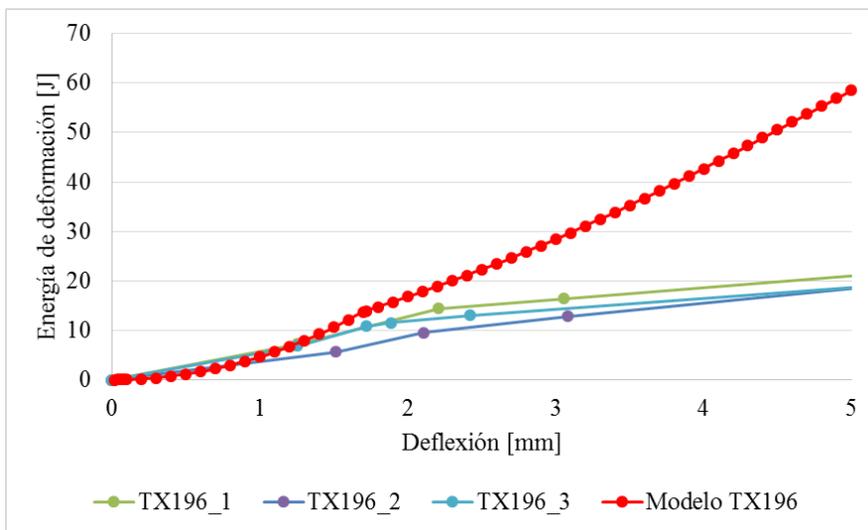


Figura 4-26: Comparación entre energía absorbida de deformación acumulada obtenida del modelo T196 con datos experimentales.

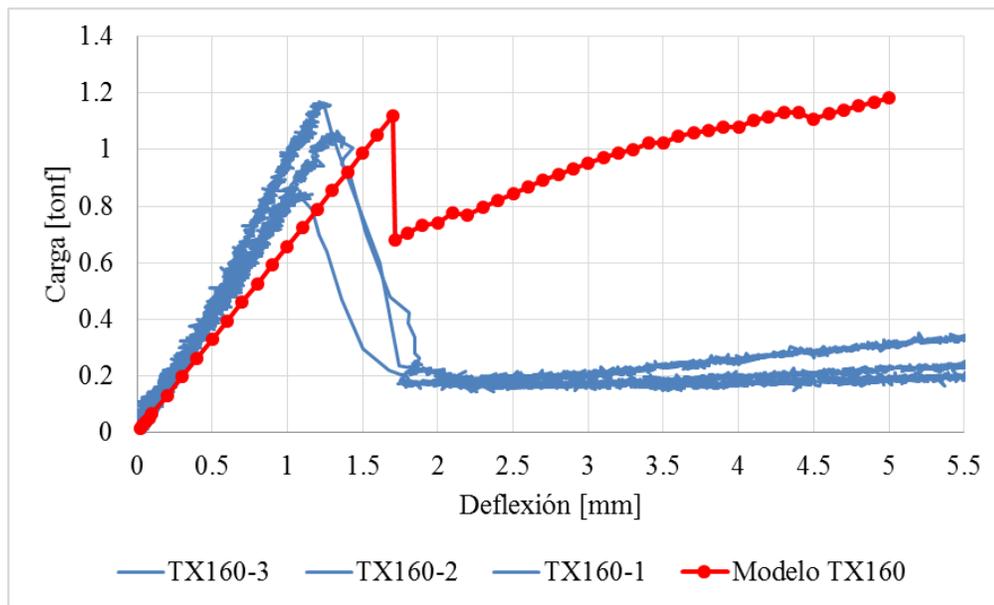


Figura 4-27: Carga vs deflexión modelo disco de shotcrete reforzado con geomalla TX160.

De la Figura 4-27 se observa la diferencia entre las pendientes iniciales, indicando un aumento directo en el módulo de elasticidad del shotcrete, que al ajustarse, bordean los 1.85 [GPa], un 16% mayor al considerado en la modelación.

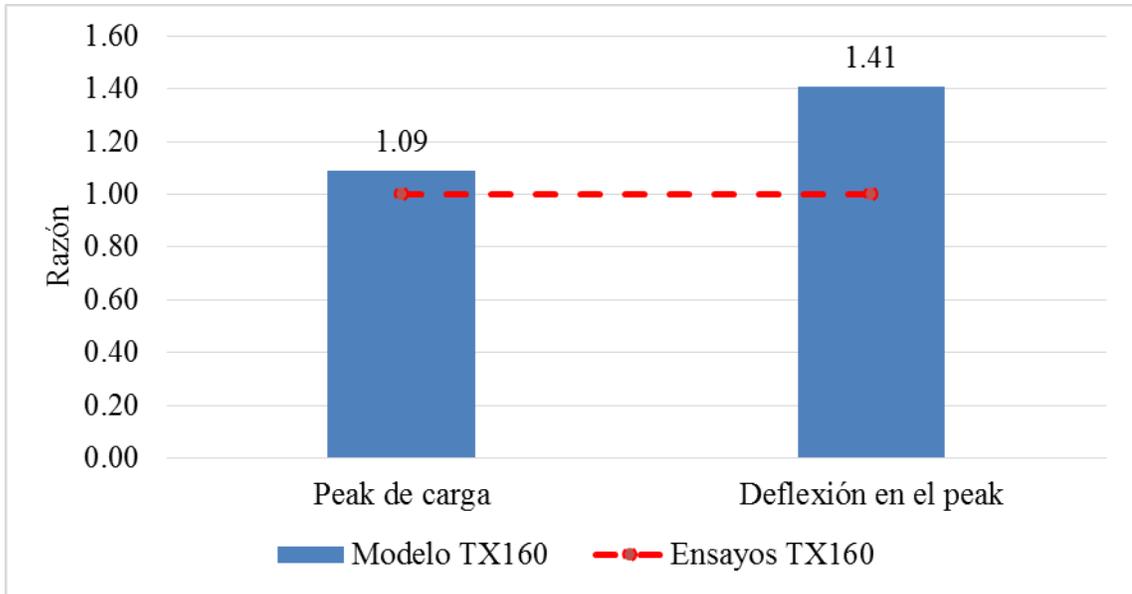


Figura 4-28: Relación entre parámetros obtenidos del modelo TX160 con datos experimentales.

A los 5 [mm] de deflexión, de acuerdo a la Figura 4-29, la energía absorbida por el disco de shotcrete obtenida por el modelo, supera 3 veces lo observado por los ensayos experimentales.

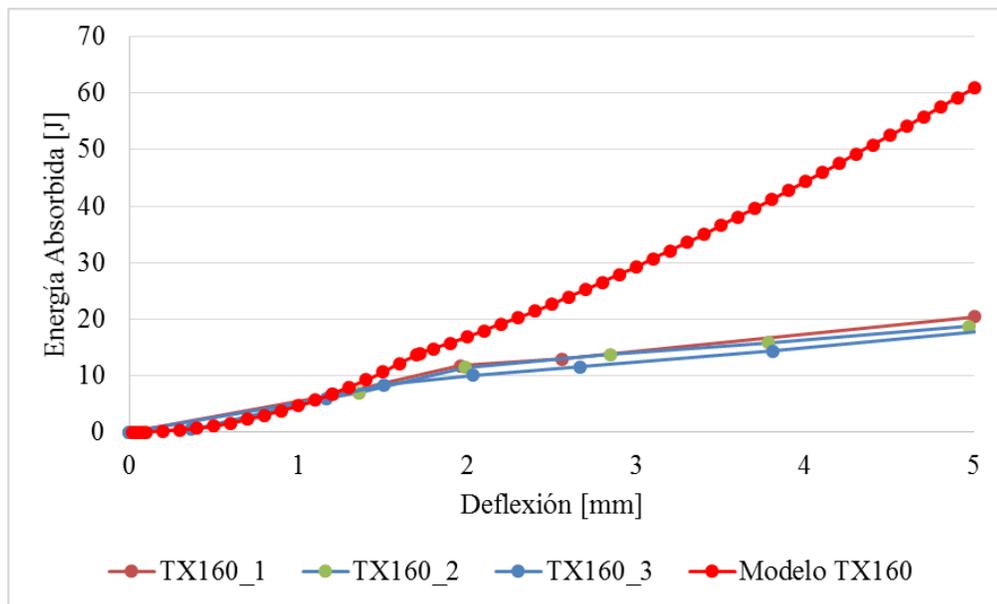


Figura 4-29: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo TX160 con datos experimentales.

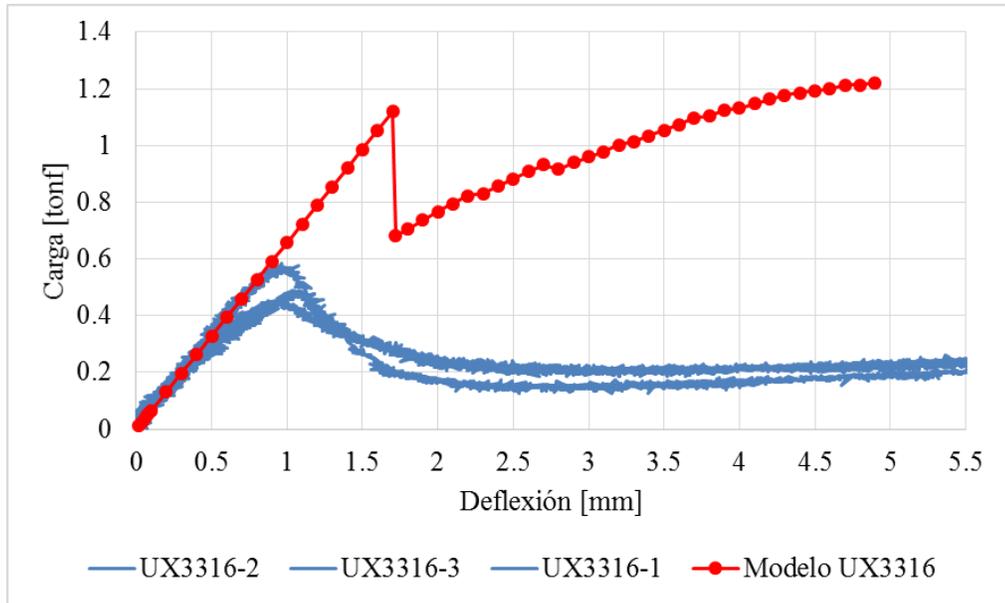


Figura 4-30: Carga vs deflexión modelo disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3316.

En la Figura 4-30 existen claras diferencias en cuanto al peak de carga y a la deflexión de agrietamiento, no obstante el módulo de elasticidad se ajusta perfectamente a los datos experimentales. Las diferencias del modelo en cuanto al peak de carga corresponden a un 119% mayor y a la deflexión en tal punto de un 71% mayor en relación a los datos experimentales (Ver Figura 4-31). Como se ha observado anteriormente, el instante de falla del shotcrete está principalmente dominado por la resistencia a tracción del material, por lo que tales diferencias entre el modelo y los datos experimentales conducen a las propiedades de la mezcla.

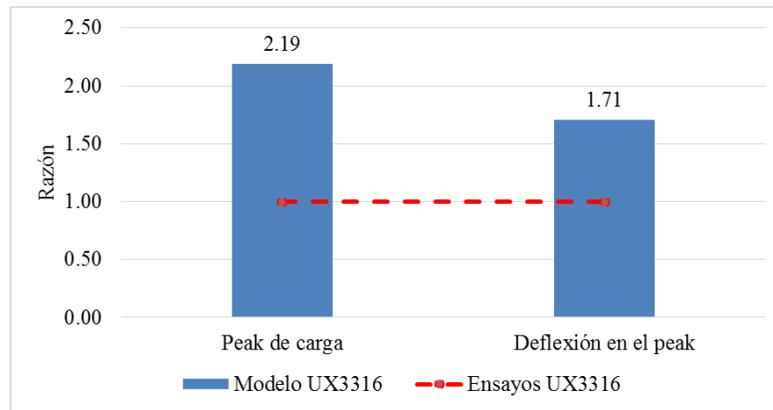


Figura 4-31: Relación entre parámetros obtenidos del modelo UX3316 con datos experimentales.

La Figura 4-32 muestra la energía de deformación absorbida por el disco, alcanzando en el modelo 60 [J], aproximadamente 3.3 veces mayor a lo observado en los datos experimentales.

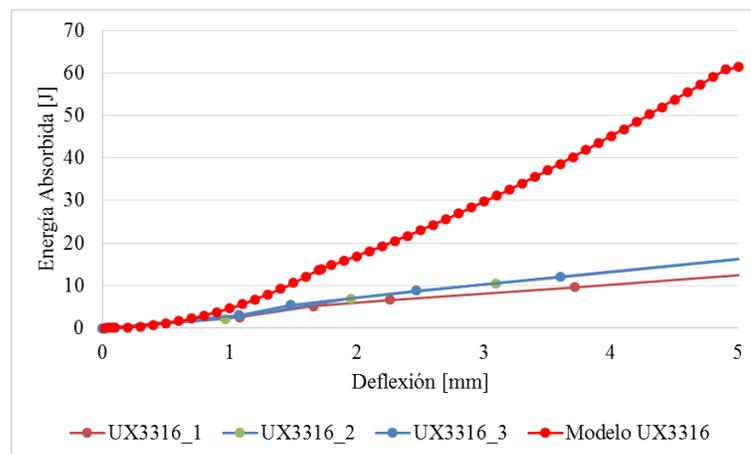


Figura 4-32: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3316 con datos experimentales.

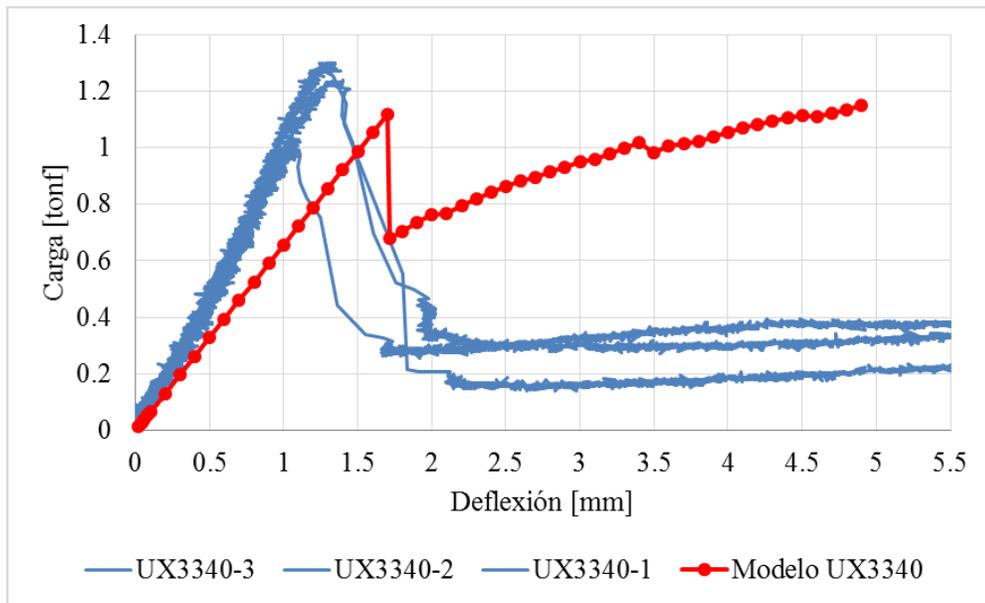


Figura 4-33: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3340.

La curva carga vs deflexión mostrada en la Figura 4-34 indica que los resultados obtenidos del modelo en cuanto a pendiente inicial y a peak de carga son inferiores a los datos experimentales. En primera aproximación, utilizando la ecuación (3-1) se prevé que el módulo de elasticidad del shotcrete que ajusta las curvas experimentales es aproximadamente 2.05 [GPa], un 29% mayor que lo impuesto al modelo UX3340.

En cuanto al peak de carga, la Figura 4-34 muestra que este valor se ajusta con un 5% de diferencia con respecto a los datos experimentales. Por otro lado, la deflexión en el peak de carga resultante del modelo muestra un 35% de diferencia por sobre los ensayos.

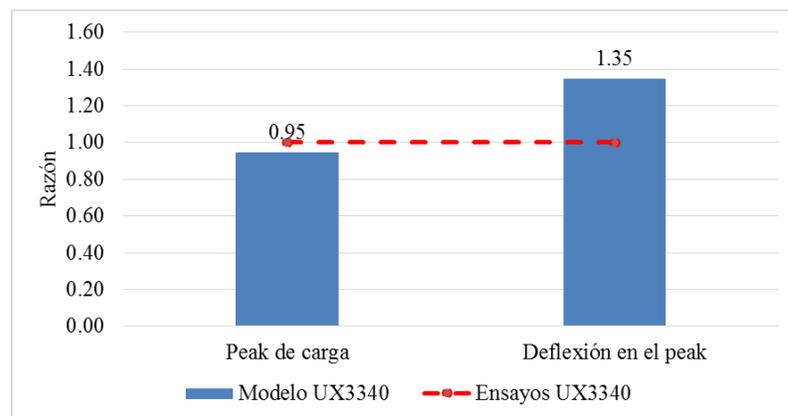


Figura 4-34: Relación entre parámetros obtenidos del modelo UX3340 con datos experimentales.

La Figura 4-35 muestra la energía de deformación absorbida por el disco de shotcrete modelado con refuerzo UX3340. De acuerdo a este, el valor de la energía resultante de la modelación supera a la obtenida en los ensayos por 2.4 veces esta magnitud.

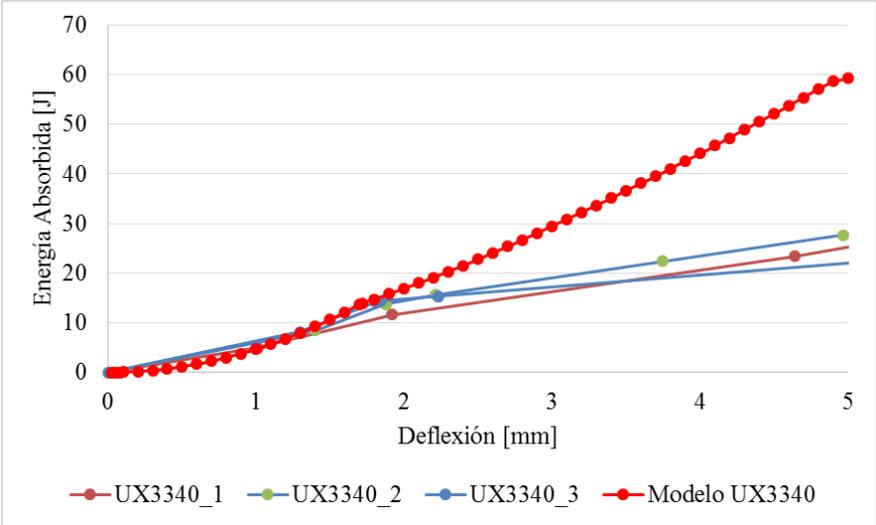


Figura 4-35: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3340 con datos experimentales.

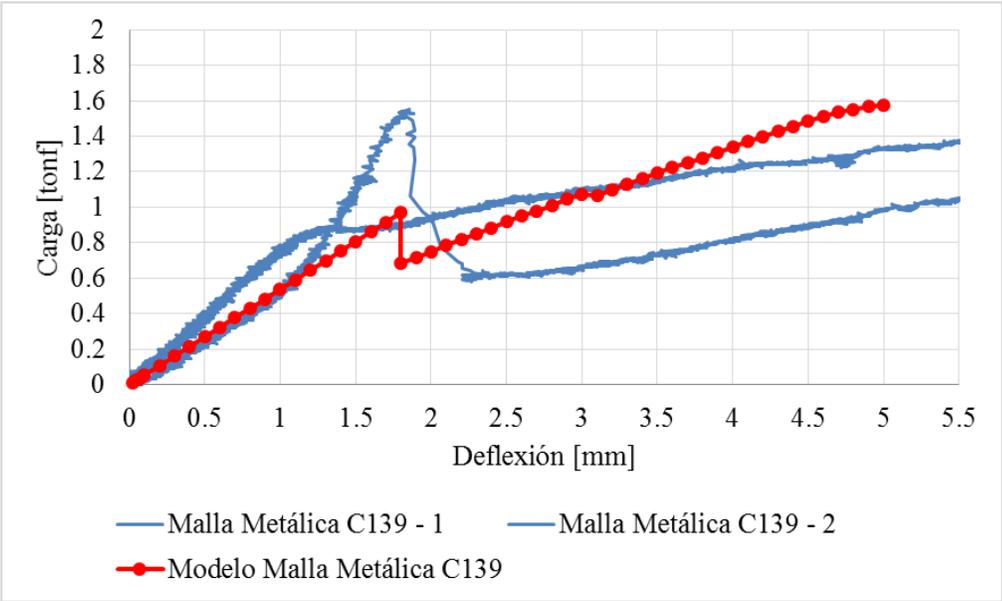


Figura 4-36: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con malla metálica C139.

La malla metálica modelada (Figura 4-36) muestra un comportamiento similar a los modelos reforzados con geomallas, diferenciándose en el tramo post-peak con una mayor pendiente. En cuanto a la comparación con los ensayos, se obtienen dos muestras representativas lo que no garantiza la veracidad de las conclusiones del presente modelo.

La Figura 4-37 muestra una comparación de las energías de deformación del modelo con los datos experimentales. De acuerdo a esto, se establece que el modelo logra representar satisfactoriamente lo observado en ambos ensayos de laboratorio.

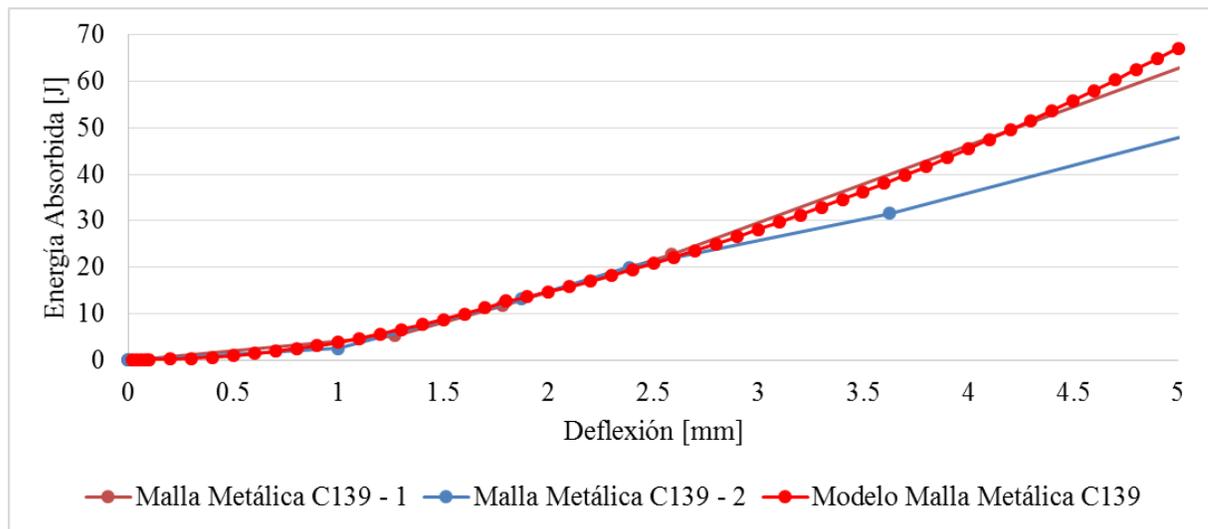


Figura 4-37: Comparación entre energía absorbida de deformación obtenida del modelo UX3316 con datos experimentales.

4.4. ANÁLISIS POST PROCESAMIENTO

4.4.1. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL SHOTCRETE CON REFUERZO FIJO

Un parámetro importante de diseño es el módulo de elasticidad del shotcrete (E_s), debido a que es utilizado para determinar la rigidez del sostenimiento del terreno y a su vez la presión máxima de sostenimiento y el desplazamiento máximo (Sandoval, 2012). Dado esto, se decide realizar un

análisis de sensibilidad con el fin de observar el efecto de distintos módulos de elasticidad en la respuesta del disco de shotcrete reforzado. Se mantendrá un refuerzo fijo, en este caso, se utiliza como refuerzo la geomalla TX196. El módulo de elasticidad calibrado por los ensayos experimentales es 1592 [MPa], de forma adicional, se realizan dos modelos con módulos de 5 [GPa] y 10 [GPa] (Figura 4-38) con tal de reproducir valores cercanos a las recomendaciones de diseño, que fluctúan entre 17 y 41 [GPa] (ACI 509-90). De este modo, se pretende comparar el efecto de la variación de este parámetro en la respuesta del disco de shotcrete reforzado.

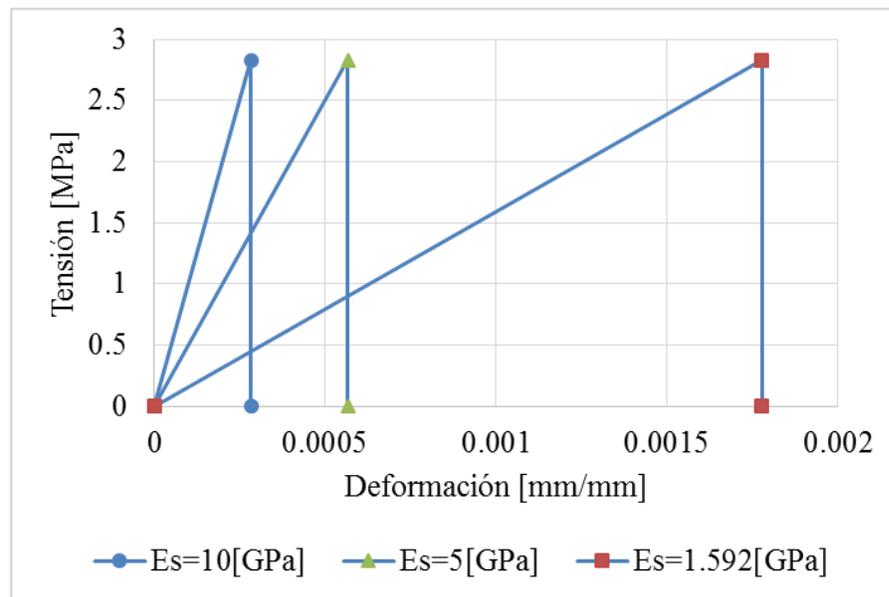


Figura 4-38: Curva esfuerzo deformación shotcrete para diferentes E_s .

La variación del módulo de elasticidad del shotcrete induce un cambio en el primer tramo de la curva tensión deformación del material de refuerzo equivalente (Figura 4-39). Al mantener el esfuerzo de agrietamiento original, la deformación a la cual el shotcrete alcanzará su punto de rotura disminuye con el aumento del módulo de elasticidad. Dado esto, es esperable que este hecho se vea reflejado en la curva carga vs deflexión del disco de shotcrete reforzado.

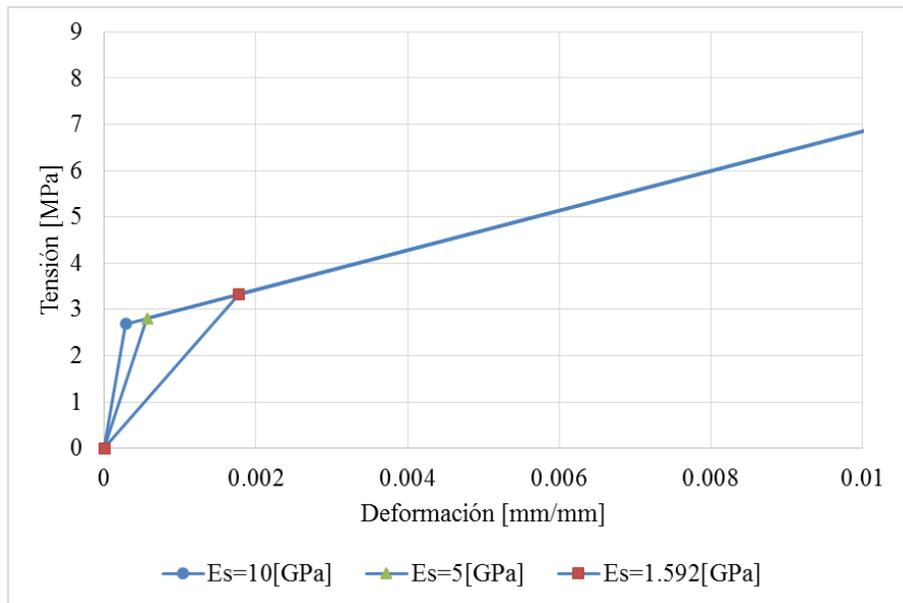


Figura 4-39: Curva esfuerzo deformación material de refuerzo equivalente TX196 - variación del módulo de elasticidad del shotcrete.

La malla de refuerzo mantiene sus propiedades originales (Figura 4-21). A continuación se muestran las curvas carga vs deflexión para el disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 comparando con distintos módulos de elasticidad del shotcrete (Figura 4-40).

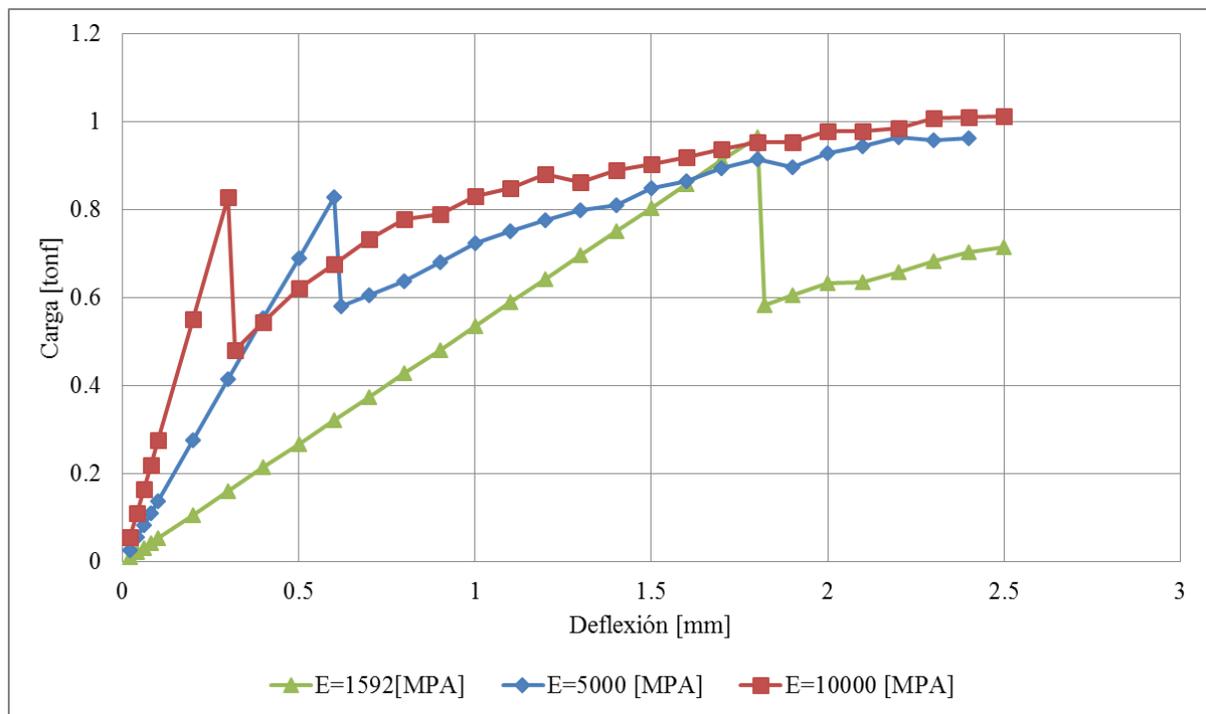


Figura 4-40: Carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 - Variación del módulo de elasticidad del shotcrete.

Al aumentar el módulo de elasticidad, la deflexión a la cual experimenta el peak de carga o el agrietamiento disminuye, reflejando lo impuesto por la ley constitutiva (Ver Figura 4-38). Para efectos de la energía de deformación absorbida, la variación de este parámetro no altera significativamente su magnitud, resultando despreciable al compararla con la energía esperada por el shotcrete reforzado.

Tabla 4-9: Módulo de elasticidad del shotcrete y deflexión de agrietamiento del sistema.

Es [MPa]	δp [mm]
1592	1.8
5000	0.6
10000	0.3

La carga alcanzada en el peak, se mantiene constante a la modificación del módulo de elasticidad del shotcrete. Este parámetro está estrictamente relacionado con la resistencia a tracción del shotcrete, definida en el modelo de elementos finitos por la variable f_t .

4.4.2. VARIACIÓN DEL ESPESOR DE REFUERZO EQUIVALENTE

El espesor de refuerzo equivalente se determina por el número de elementos en el espesor del sistema, por lo que es una variable dependiente del mallado. El siguiente análisis se enfoca en observar los cambios reflejados en la curva carga deflexión al modificar el espesor del disco de refuerzo equivalente, cambiando con esto, las propiedades de este material. Se realizan dos análisis, utilizando espesores de 16 [mm], 8 [mm] y 2 [mm] para el disco de refuerzo equivalente (Figura 4-41).

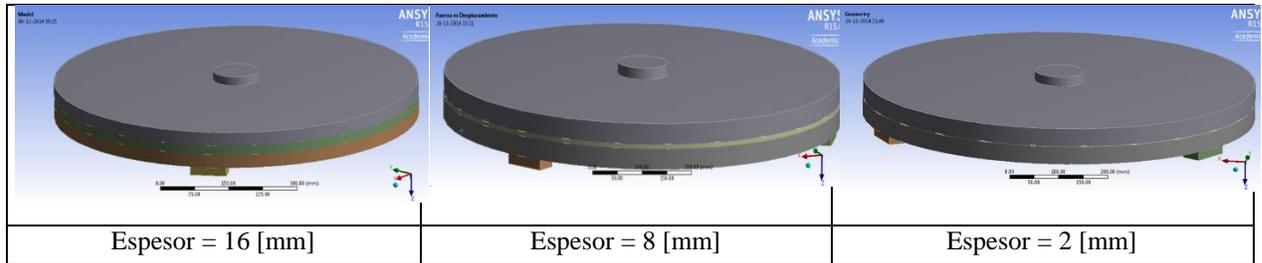


Figura 4-41: Variación del espesor del disco de refuerzo equivalente.

La geometría, las condiciones de borde y las propiedades de los materiales involucrados se han mantenido constantes con tal de observar el efecto del cambio en el espesor del disco de refuerzo equivalente. La malla utilizada en ambos casos corresponde a la geogrilla TX196.

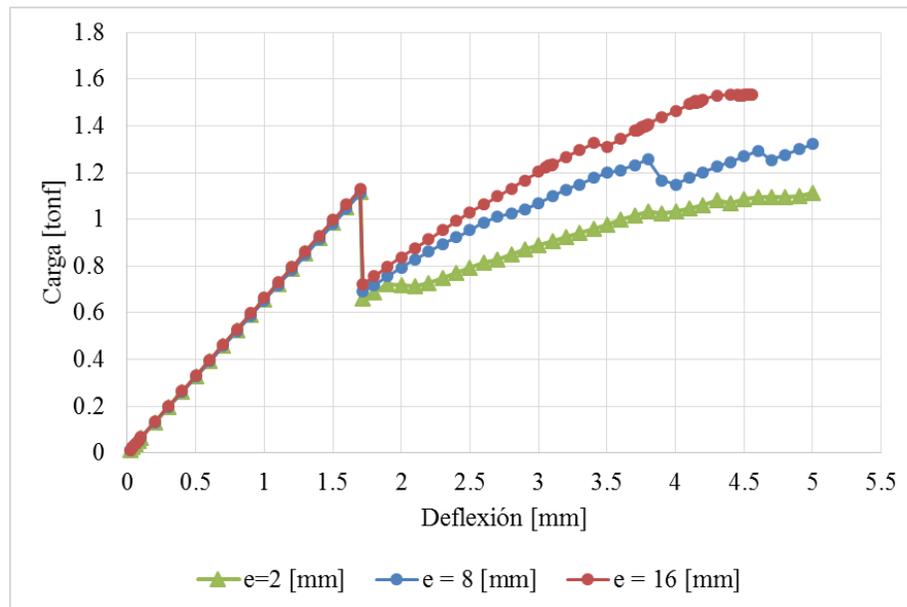


Figura 4-42: Curva carga vs deflexión disco de shotcrete reforzado con malla geosintética TX196 - variación del espesor del disco de refuerzo equivalente.

El modelo con espesor reducido afecta dos puntos de interés; la caída de carga en el punto de agrietamiento y la rigidez carga deflexión post peak. Al disminuir el espesor del disco de refuerzo equivalente, el espesor del disco inferior de shotcrete aumentará lo que permitiendo al modelo contar con más elementos agrietados antes de encontrarse con el material reforzado. Es por esto que se observa un aumento en la pérdida de carga (Ver Figura 4-43).

Por otro lado, al tener una porción de menor volumen con propiedades de refuerzo equivalente, el disco completo se flexibiliza, observando una disminución de la pendiente post-peak (Ver Figura 4-44).

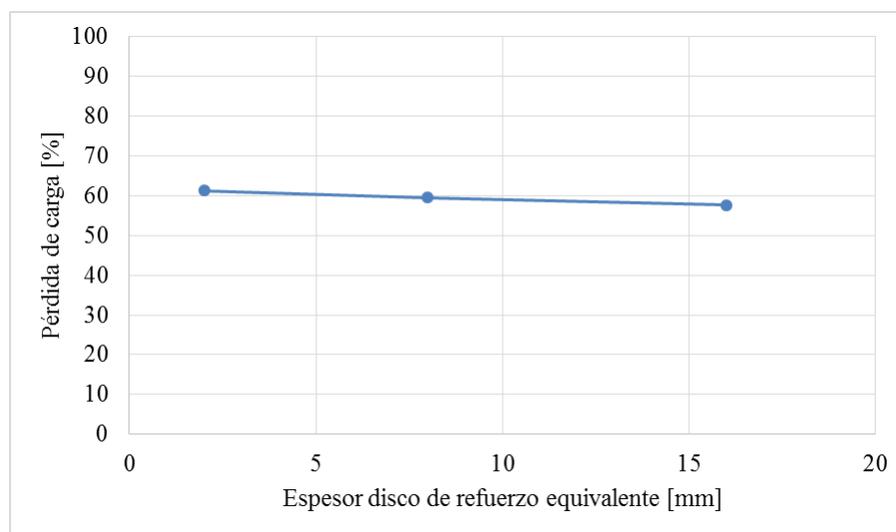


Figura 4-43: Variación de la pérdida de carga post-peak en función del espesor del refuerzo equivalente – Curva carga vs deflexión Modelo TX196.

De acuerdo a la Figura 4-43 el efecto de la pérdida de carga no se ve afectado por el espesor del refuerzo equivalente, resultando en una diferencia máxima de 0.06 [tonf] con respecto al modelo con mayor espesor del refuerzo.

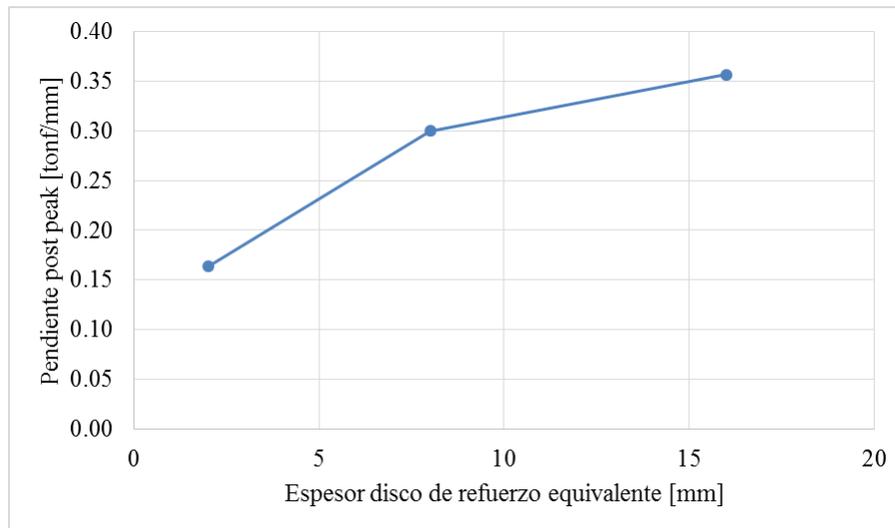


Figura 4-44: Variación de la pendiente post peak en curva carga deflexión en función del espesor de refuerzo equivalente – Curva carga vs deflexión Modelo TX196.

Al variar el espesor del disco de refuerzo equivalente, la pendiente post peak en el gráfico carga vs deflexión disminuye con el espesor (Figura 4-44). La pendiente post-peak en los ensayos resulta un 97.7 % menor a la pendiente del rango lineal, en cambio, el modelo no supera el 34 [%] de reducción, donde el mejor caso se encuentra al modelar el disco de refuerzo equivalente de 2 [mm] de espesor.

Finalmente, la disminución del espesor del disco de material compuesto permite que el error al utilizar la regla de las mezclas en la obtención de propiedades equivalentes sea menor y además permite que el disco inferior de shotcrete sea de mayor espesor, lo que aumenta la caída de carga por agrietamiento (Sección 4.4.5).

4.4.3. CAMBIO EN EL TIPO DE CONTACTO ENTRE EL SHOTCRETE Y EL REFUERZO EQUIVALENTE

El modelo de elementos finitos del disco de shotcrete reforzado asume que los contactos que se generan entre el disco de refuerzo equivalente y las capas superior e inferior de shotcrete, son del tipo “bonded”, es decir, existe compatibilidad perfecta de deformaciones entre estos cuerpos. Luego del agrietamiento, esta hipótesis pierde validez porque ya no existe esta compatibilidad, y

el desplazamiento relativo entre estos cuerpos comienza a tomar mayor sentido al considerar las grandes deformaciones provocadas por la flexión del disco. Es por esto que se confecciona un modelo considerando contactos del tipo “frictionless”, o fricción nula, permitiendo deslizamiento entre los cuerpos comprometidos.

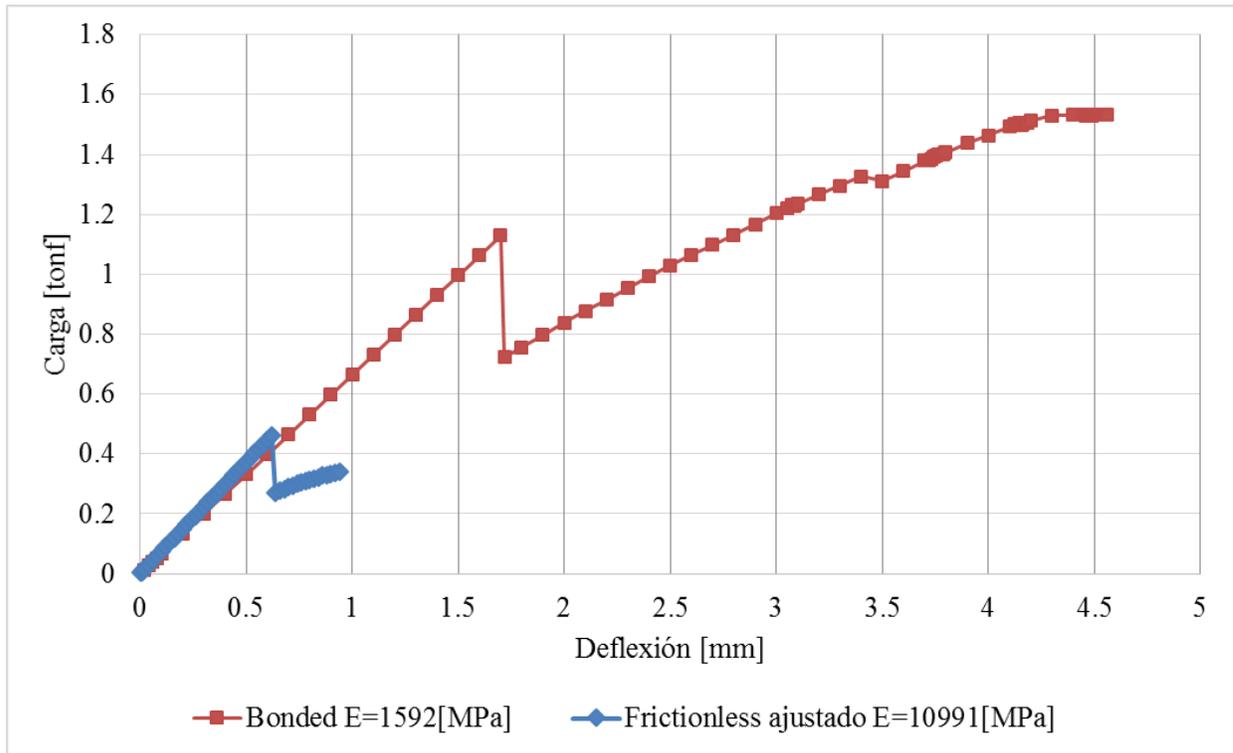


Figura 4-45: Carga vs deflexión de disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196 - cambio del tipo de contacto entre shotcrete y refuerzo equivalente.

El modelo con contactos “frictionless” resulta más flexible que el modelo con contactos “bonded”, afectando incluso a la zona lineal en la curva carga vs deflexión. Esto induce a que el agrietamiento no se produzca a la misma deflexión que el modelo original. Este efecto termina por descalibrar el modelo, forzando una modificación del módulo de elasticidad del shotcrete a 10991 [MPa] para igualar el punto de agrietamiento (Ver Figura 4-45).

La pendiente post peak se reduce en un 27 % (Tabla 4-10), lo cual replica de mejor manera lo observado en los ensayos experimentales. Pese a esta mejora, el modelo debe consistir en una combinación de ambos, es decir, inicialmente con comportamiento “bonded” hasta el peak de carga, y a partir de ese punto, “frictionless”.

Tabla 4-10: Cambio de pendiente post peak entre modelo “bonded” y “frictionless”.

Modelo	E [MPa]	Pendiente [tonf/mm]
Frictionless	10991	0.23
Bonded	1592	0.36

4.4.4. CHEQUEO DEL PERFIL DE DEFORMACIONES

Dentro del modelo de elementos finitos, las deformaciones corresponden a la variable independiente y las tensiones son obtenidas a través de la ley constitutiva del material. Es por esto que es importante observar con mayor detalle cómo se distribuyen las deformaciones dentro del disco. Esto a su vez, permitirá determinar la posición del eje neutro. Es importante destacar la relevancia del eje neutro en el modelo, ya que será reflejo del agrietamiento del disco, debiendo cambiar de posición frente a este fenómeno. Dada la geometría del disco y la posición de la zona de refuerzo, de espesor 2 [mm], el eje neutro del sistema se ubica en la mitad del espesor, es decir, a los 40 [mm] de altura desde la base del disco. Cabe destacar que el tipo de contacto utilizado entre el refuerzo y el shotcrete es del tipo “bonded” debido a que se priorizará el modelo con E_s calibrado inicialmente.

Del modelo de shotcrete reforzado con geomalla TX196 se extraen las deformaciones principales, en tres radios distintos; 60 [mm], 200[mm] y 300 [mm], medidos desde el centro (Figura 4-46, Figura 4-48, Figura 4-50). Se registran las deformaciones en el espesor con tal de construir el perfil de deformaciones.

Es posible utilizar las deformaciones principales debido a que los esfuerzos de corte en la sección estudiada son de baja magnitud, del orden de los pascales. Esta verificación conlleva a que el error infringido al utilizar esta clase de deformaciones sea despreciable.

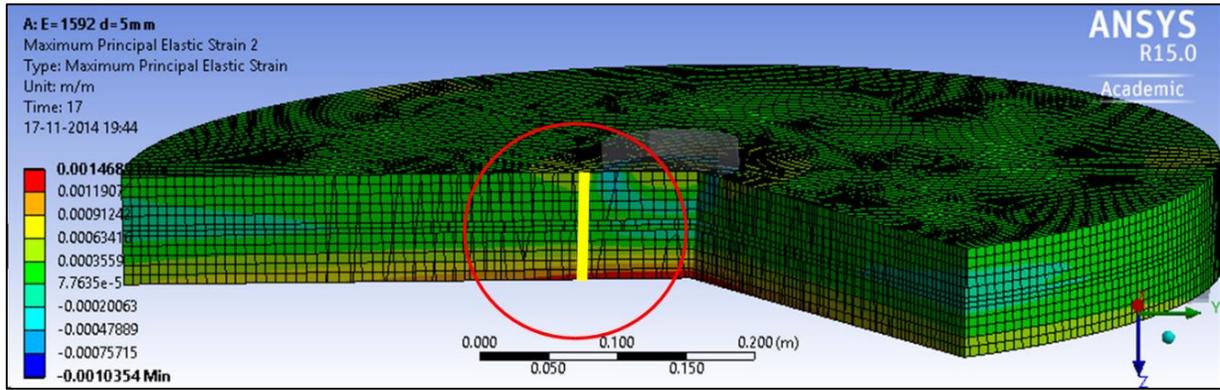


Figura 4-46: Perfil de deformaciones a 60 mm del centro del disco.

La Figura 4-47 muestra el perfil de deformaciones en el peak de carga a 60 mm del centro del disco.

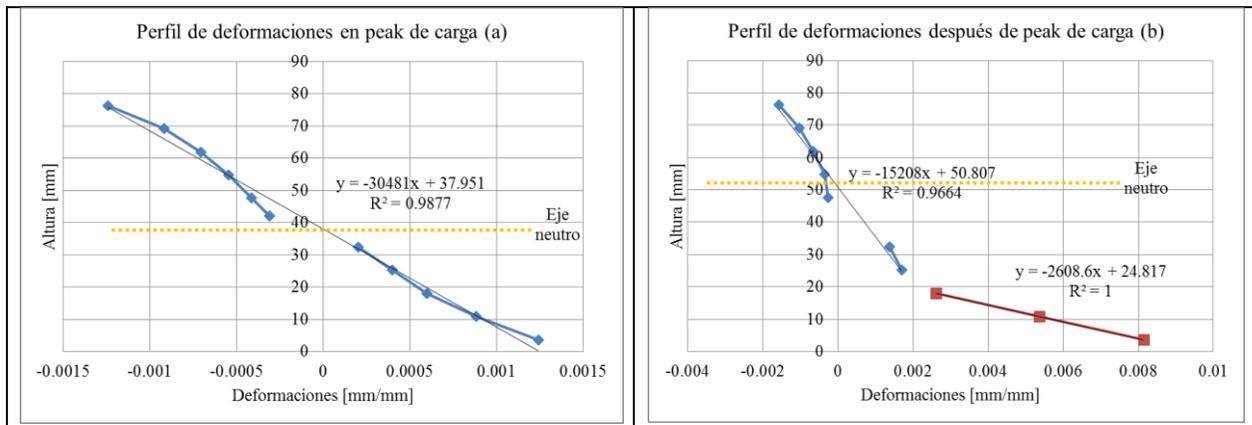


Figura 4-47: Perfil de deformaciones a 60 mm del centro del disco.

De la Figura 4-47 (a) se desprende que el eje neutro se ubica a los 37.9 [mm] de altura, medidos desde la base del disco, aproximadamente la mitad del espesor del disco de shotcrete reforzado. Esto indica que en este punto, el sistema actúa elásticamente sin presencia de elementos agrietados.

Luego del peak de carga, Figura 4-47 (b), el perfil de deformaciones es mostrado por el Figura 4-47, donde se observa que el eje neutro se ubica a los 50.8 [mm] de altura, aumentando 12.86 [mm] con respecto al perfil de deformaciones en el peak de carga. Los puntos en rojo, representan la porción del disco que se encuentra agrietada, o ha superado la deformación de agrietamiento del shotcrete; 0.00178 [mm/mm].

Al alejarse del centro del disco, a 200 [mm] (Figura 4-48), se construye un segundo perfil de deformaciones, antes y después del peak de carga.

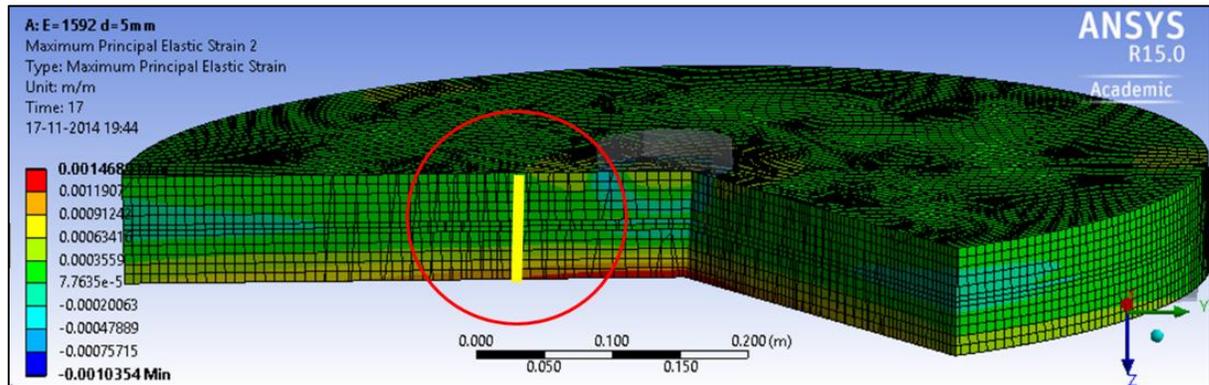


Figura 4-48: Deformaciones principales a 200 mm del centro del disco.

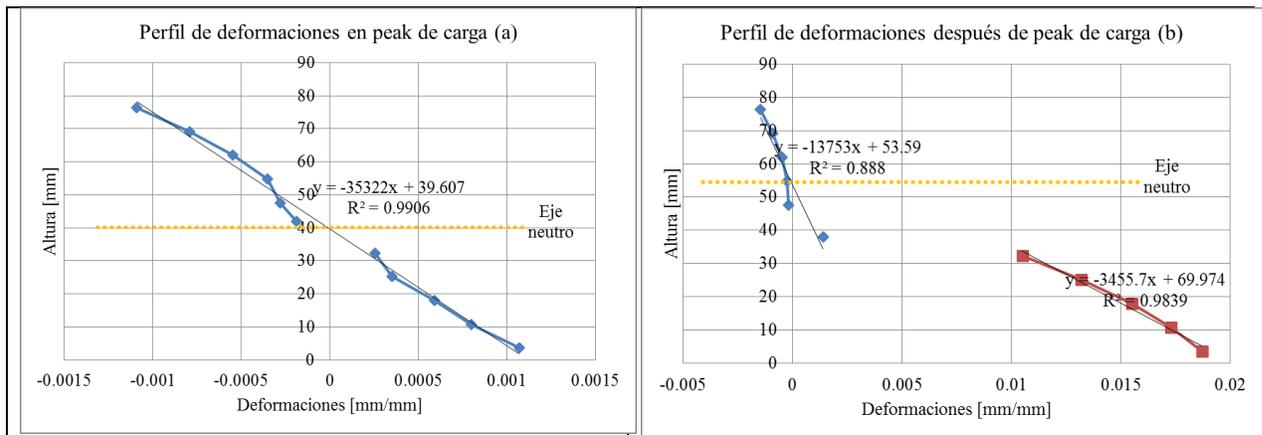


Figura 4-49: Perfil de deformaciones a 200 mm del centro del disco.

Según la Figura 4-49 (a), el eje neutro se ubica a los 39.6 [mm] de altura, manteniéndose a aproximadamente la mitad del disco de shotcrete reforzado. Esto indica que el disco de shotcrete reforzado experimenta tensiones y deformaciones dentro del rango lineal.

Luego del peak de carga, Figura 4-49 (b), el eje neutro sube a los 53.6 [mm], aumentando en 13.99 [mm] respecto de la ubicación en el peak de carga. Los puntos demarcados en rojo corresponden a deformaciones mayores a la de agrietamiento, representando el sector inferior del disco que deja de contribuir a la rigidez del disco.

Se realiza un tercer análisis a 300 [mm] del centro del disco, con tal de asegurar un comportamiento de la posición del eje neutro.

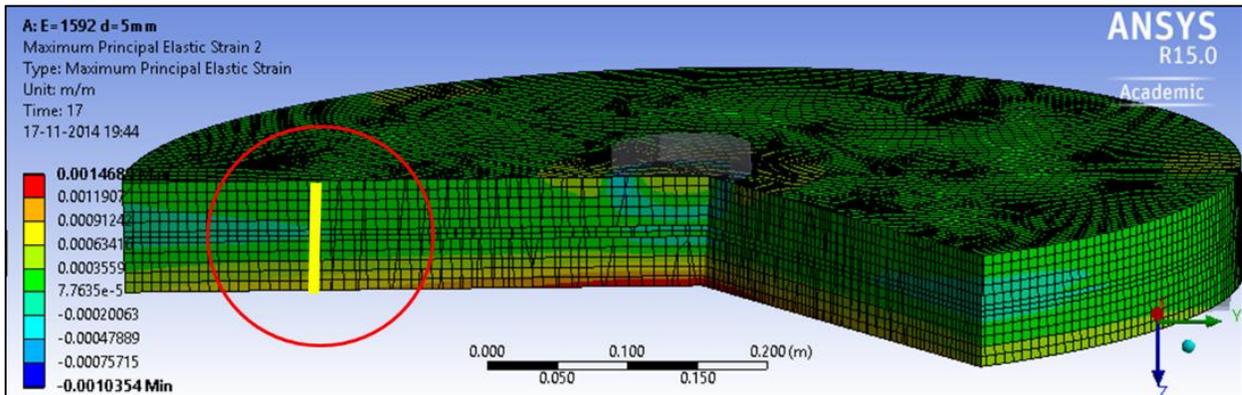


Figura 4-50: Deformaciones máximas a 300 mm del centro del disco.

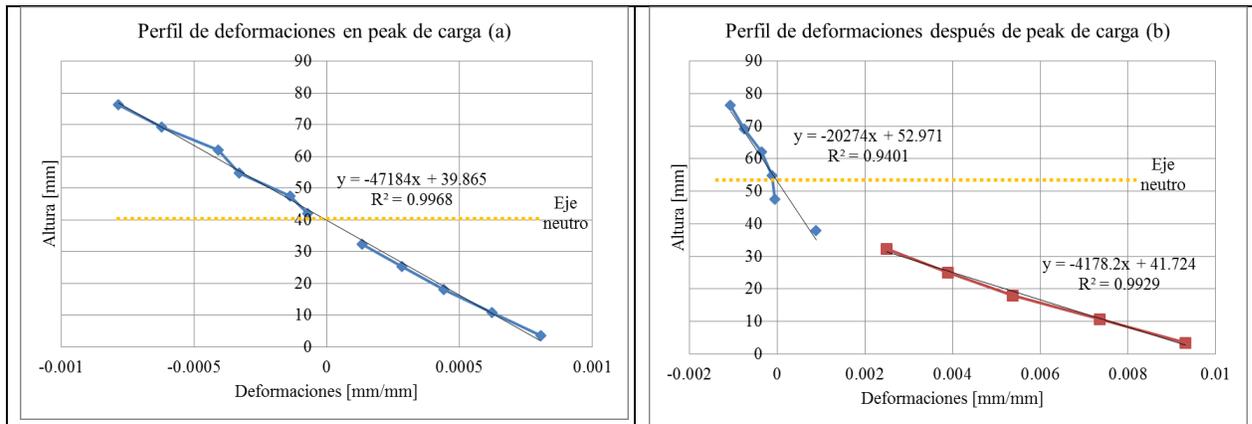


Figura 4-51: Perfil de deformaciones en peak de carga a 300 mm del centro del disco.

De la Figura 4-51 se tiene que el eje neutro se encuentra a 53 [mm] de altura. El agrietamiento induce un alza en el eje neutro en aproximadamente 13 [mm] a lo largo de la grieta, indicando que no es suficiente para irrumpir en la zona superior de la capa modelada de shotcrete reforzado. Se observa que la modelación del material de refuerzo equivalente actúa como una barrera entre la zona inferior y superior del disco, limitando las deformaciones. Esto debido a que, por limitaciones del modelo, la zona de material compuesto es incapaz de representar el agrietamiento de la porción de shotcrete, impidiendo la propagación de la grieta en el espesor del disco. La limitación del modelo consiste en la incapacidad de representar la fractura del material equivalente en la ley constitutiva.

4.4.5. ANÁLISIS DE LA REDUCCIÓN DE CARGA

El modelo de elementos finitos representa adecuadamente el comportamiento del shotcrete reforzado en el rango del comportamiento lineal de los materiales, rescatando el peak de carga y deflexión observadas en los distintos ensayos experimentales con refuerzos de geogrillas y malla metálica. De acuerdo a los datos de laboratorio, luego del peak de carga, el sistema experimenta una pérdida abrupta de carga.

La pérdida de carga resultante de los modelos no logra equiparar lo observado en los ensayos de laboratorio. En la Tabla 4-11 se muestran los porcentajes de pérdida de carga experimentales para los distintos ensayos con geogrillas de refuerzo. En el caso de los ensayos con malla metálica la caída representa aproximadamente un 50% del peak.

Tabla 4-11: Promedios de reducción de carga en porcentaje respecto del peak, para discos de shotcrete con diferentes refuerzos geosintéticos utilizados en ensayos de laboratorio.

Geomalla	Pérdida de carga [%]
TX160	83.9
TX196	83.7
UX3340	80.4
UX3316	65.2

De acuerdo a esto, al observar el ensayo del disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196, la reducción esperada para el modelo mostrado es, en promedio, un 83.7%. Esto representa un 50.7% más que lo obtenido por el modelo de elementos finitos. Esta diferencia se ve reflejada directamente en la propagación del agrietamiento en el espesor del disco de shotcrete reforzado, en otras palabras, la cantidad de shotcrete que deja de resistir carga es proporcional a la caída.

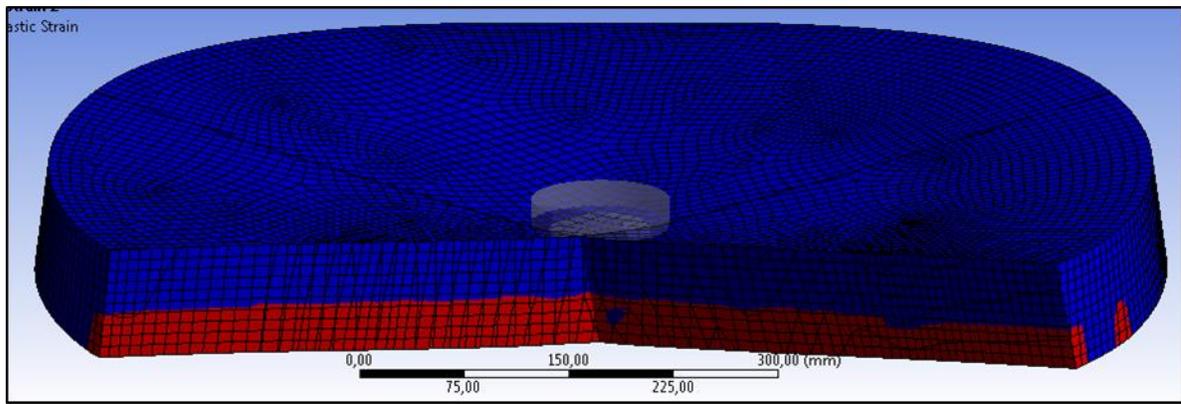


Figura 4-52: Agrietamiento de franjas disco de shotcrete reforzado TX196, después del peak de carga.

La grieta formada no logra superar la zona del disco de refuerzo equivalente, por la incapacidad de esta última de representar el agrietamiento del shotcrete. Este efecto, asociado a la ley constitutiva, está siendo considerado por el shotcrete al ser modelado utilizando el modelo CONCRETE de Solid65. Este hecho se vislumbra en el análisis de la posición del eje neutro, antes y después de la caída.

De acuerdo a la incapacidad de agrietarse sobre el refuerzo y respaldado por el chequeo del perfil de deformaciones, se determina que existe un factor limitante del modelo relacionado intrínsecamente con la forma de modelar la malla de refuerzo. El material de refuerzo equivalente no es capaz de incluir el efecto del agrietamiento del shotcrete, imposibilitando la continuidad de la grieta en el espesor del disco.

El sistema disco de refuerzo equivalente inicialmente se comporta como un par de resortes en paralelo, considerando el aporte del shotcrete y del refuerzo (Figura 4-53).

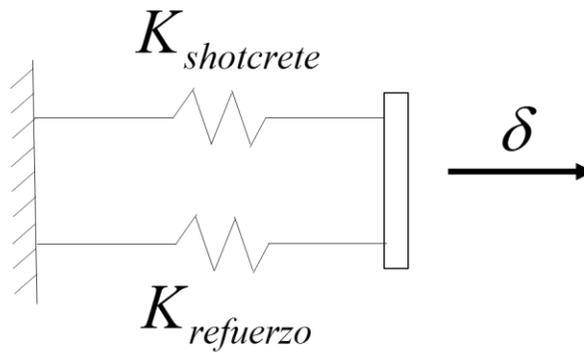


Figura 4-53: Sistema disco de refuerzo equivalente - no agrietado.

Cuando el elemento ha superado la deformación de agrietamiento, y dado que el sistema está siendo controlado por desplazamientos, entonces la carga que resiste la porción de shotcrete es liberada de forma abrupta.

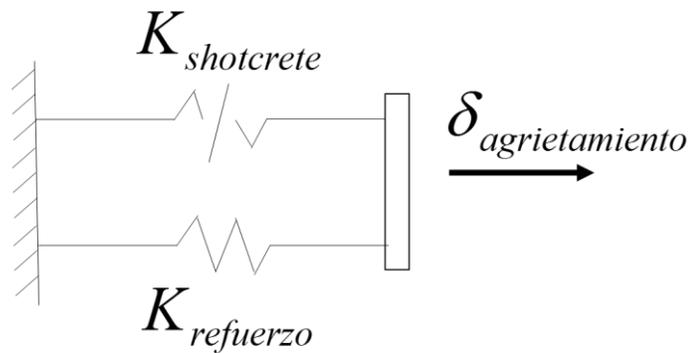


Figura 4-54: Sistema refuerzo equivalente – agrietado.

Este efecto está representado gráficamente en la Figura 4-55 por la línea roja, donde se muestra la ley constitutiva del material compuesto de refuerzo. La primera pérdida de carga es provocada por el agrietamiento del shotcrete, luego la curva tensión vs deformación continúa aportando rigidez por el refuerzo hasta la falla de este.

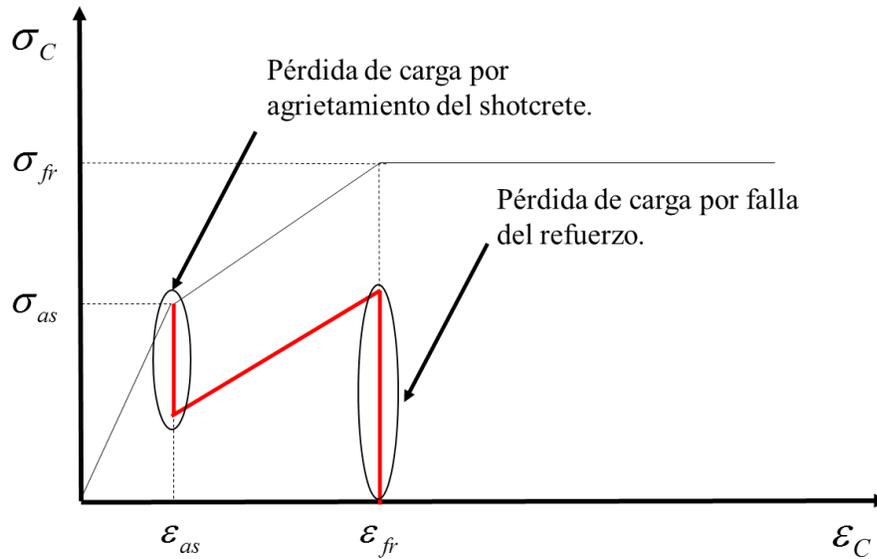


Figura 4-55: Ley constitutiva del compuesto considerando la pérdida de aporte del shotcrete y la compatibilidad de deformaciones.

Entonces, la carga liberada tiene relación con las rigideces de cada elemento, calculada considerando un elemento de refuerzo equivalente, que estará formada por una parte de refuerzo y una matriz de shotcrete. La rigidez de cada una se calcula utilizando la ecuación (4-1).

$$K = \frac{A \cdot E}{L} \quad (4-1)$$

$$F = F_{shotcrete} + F_{refuerzo} \quad (4-2)$$

$$\delta_{refuerzo} = \delta_{shotcrete} \quad (4-3)$$

Antes del agrietamiento del shotcrete existe compatibilidad de deformaciones (Ecuación 4-3) y la carga del sistema se distribuirá entre el refuerzo y el shotcrete (Ecuación 4-2). Se calcula la fuerza que resiste el shotcrete en el punto de agrietamiento, la cual será liberada cuando este se agriete. Los resultados se presentan en la Tabla 4-12, donde A_m representa el área de refuerzo en un elemento de compuesto de área A , E_m y K_m corresponden al módulo de elasticidad y rigidez axial del refuerzo.

Tabla 4-12: Distribución de carga por rigidez discos de shotcrete reforzados con geomallas.

MALLA	Am	A	Am	Em	Km=Am*Em/Lm	As	Es	Ks=As*Es/Ls	F	Fs=F/(Km/Ks+1)	Fm=F-Fs	Fs/F	Fm/F
	[mm ²]	[mm ²]	[mm ²]	[MPa]	[MPa*mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa*mm]	[tonf]	[tonf]	[tonf]	[%]	[%]
TX196	1.64	60	0.027	4566.800	124.826	0.973	1592.000	1548.485	1.000	0.925	0.075	93	7
TX160	1.64	40	0.041	4839.625	198.425	0.959	1592.000	1526.728	1.000	0.885	0.115	88	12
UX3340	16	112	0.143	3360.000	480.000	0.857	1592.000	1364.571	1.000	0.740	0.260	74	26
UX3316	16	112	0.143	5161.100	737.300	0.857	1592.000	1364.571	1.000	0.649	0.351	65	35

Los valores obtenidos en la Tabla 4-12 se acercan en gran medida a las caídas de carga observadas en los ensayos de laboratorio, obteniéndose un promedio de 90.5 % para las mallas triaxiales y un 69.5 % para las uniaxiales, mientras que en los ensayos se observan promedios de 83.8 y 72.8 respectivamente. La comparación entre los calculados teóricamente, con los resultados del modelo y los ensayos se presentan en la Figura 4-56.

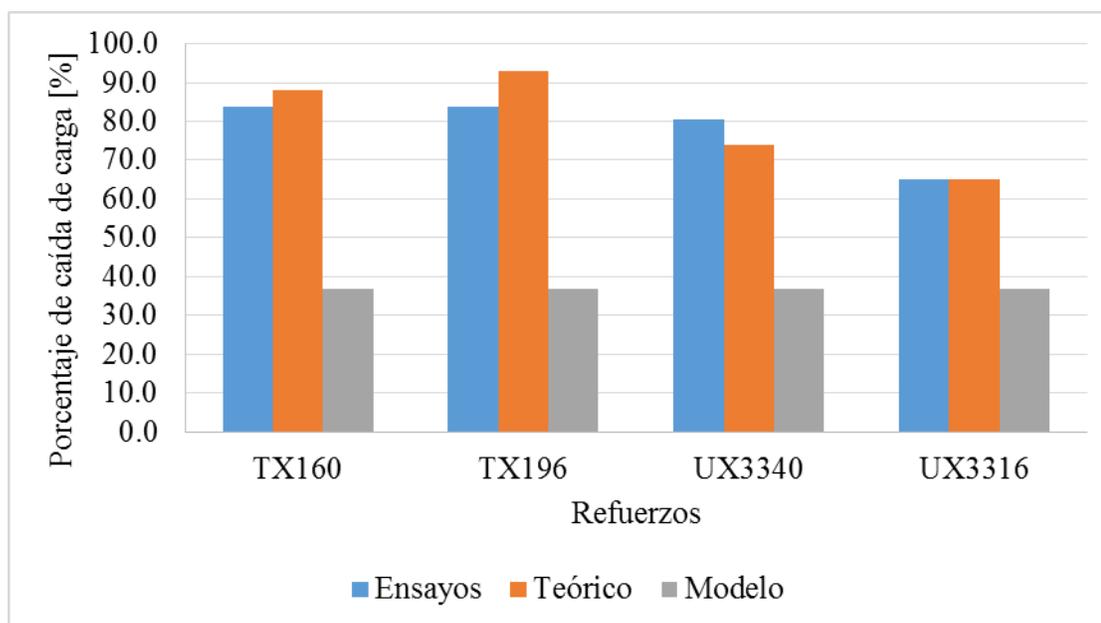


Figura 4-56: Porcentajes de caída de carga para ensayos ASTM C1550-12 de shotcrete reforzado con geomallas.

Una forma de representar el efecto de la pérdida de carga teórica en el modelo, es incorporar manualmente el porcentaje calculado a los resultados de la modelación. Esto se muestra en las Figura 4-57, Figura 4-58, Figura 4-59 y Figura 4-60.

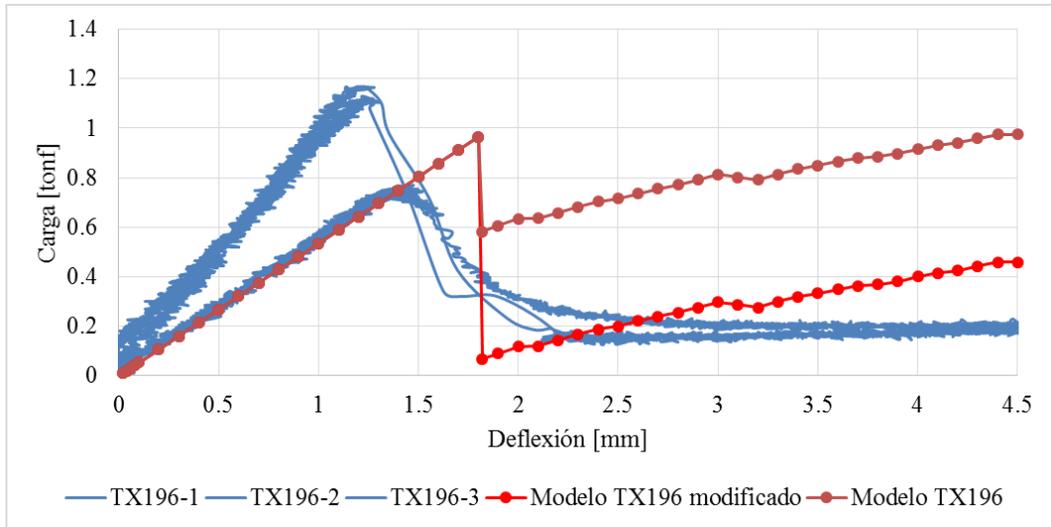


Figura 4-57: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla TX196.

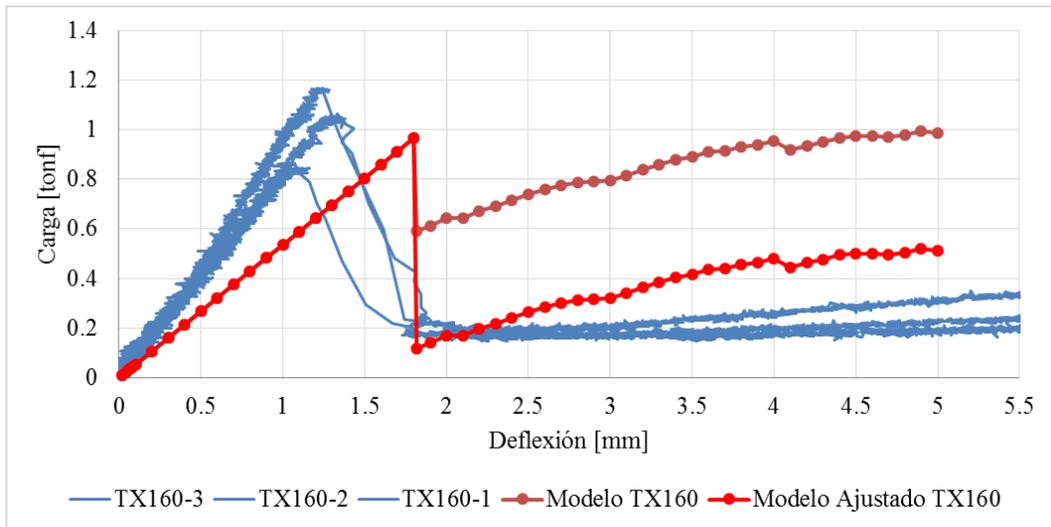


Figura 4-58: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla TX160.

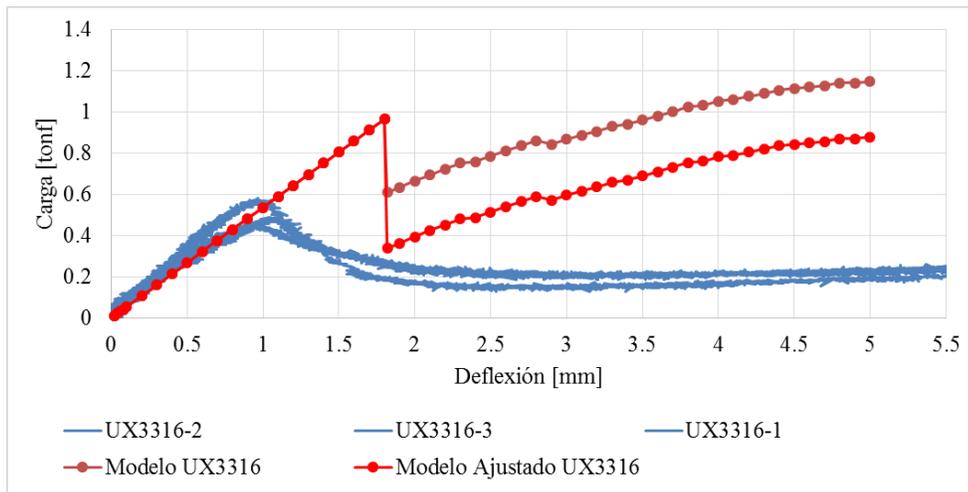


Figura 4-59: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3316.

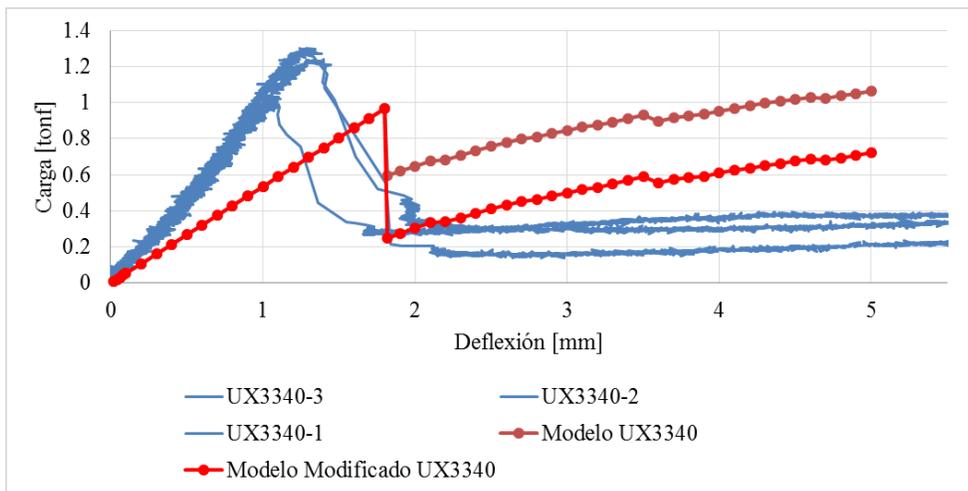


Figura 4-60: Modelo modificado por pérdida de carga post-peak calculada teóricamente, para el disco de shotcrete reforzado con geomalla UX3340.

La curva modificada de la Figura 4-59, del disco de shotcrete reforzado con malla geosintética uniaxial UX3316 muestra la mayor diferencia en cuanto al comportamiento post-peak observado en los resultados experimentales alcanzando una diferencia de 0.7 [tonf] a los 5 [mm] de deflexión. En cambio, las curvas modificadas correspondientes a los discos de shotcrete reforzado mallas triaxiales TX196 y TX160 presentan un mejor ajuste con diferencias de 0.25 [tonf] y 0.26 [tonf] a los 5 [mm] de deflexión. Estas diferencias radican en la diferencia de pendiente post-peak entre el modelo y los datos experimentales.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

5.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los datos experimentales, la malla de refuerzo comienza a tomar mayor participación en el comportamiento carga deflexión del disco de Shotcrete reforzado, al finalizar la etapa lineal, observándose en los gráficos distintas cargas residuales y energía absorbida dependiendo del tipo de malla utilizada. La etapa inicial depende principalmente de las propiedades del shotcrete.
- Sin importar la malla de refuerzo utilizada es posible encontrar comportamientos similares hasta el punto de agrietamiento. Dado esto, es claro que la malla de refuerzo refleja su importancia en el post peak de carga siendo capaz de deformarse absorbiendo energía.
- Los resultados indican que el peak de carga y deflexión del modelo, en el rango lineal, se encuentran dentro de los valores esperados, comparado con los datos proporcionados por los ensayos experimentales realizados por la investigación del profesor Ricardo Moffat. El comportamiento del shotcrete reforzado, hasta el peak de carga es reproducible a través del modelo de elementos finitos.
- El modelo lineal de shotcrete no reforzado presenta un módulo de elasticidad promedio de 1410 [MPa], calculado con la fórmula de Bassali. Al incorporar la no linealidad del material al modelo, el módulo disminuye a 1406 [MPa]. Este hecho se debe al agrietamiento de los primeros elementos en la zona inferior del disco, donde en el peak de carga, para el modelo lineal, se observan elementos en el centro del disco que ya han superado el esfuerzo de agrietamiento de 2.83 [MPa].
- En el modelo no lineal no reforzado, se alcanza el peak de carga a los 1.7 [mm] de deflexión, a la misma deflexión, en el modelo lineal no reforzado, ya se ha superado el esfuerzo de agrietamiento, de acuerdo a la distribución de esfuerzos equivalentes del modelo lineal. Con esto se verifica la no linealidad del material en el modelo.

- Respecto al error incurrido al considerar un modelo lineal, es imposible capturar los parámetros esenciales para llevar a cabo los objetivos del presente estudio; peak de carga y deflexión alcanzada en este punto. La capacidad de agrietarse produce una notable disminución respecto de los modelos anteriores lo que demuestra la importancia del efecto del agrietamiento del Shotcrete en la modelación del ensayo ASTM C1550-12. En cuanto a la capacidad al aplastamiento, no se requiere incorporar al modelo la no linealidad, debido a que el agrietamiento se alcanza mucho antes y es el fenómeno que controla el comportamiento del disco de shotcrete.
- Se verifica el patrón de falla sobre el disco de shotcrete al observar el modelo no lineal luego en el momento del colapso del sistema, produciéndose la concentración de deformaciones en tres franjas en la zona inferior del disco, tal como ocurre en cada uno de los ensayos experimentales. Las figuras presentadas (Figura 4-15) muestran claramente el patrón de falla del disco de shotcrete, donde predomina la propagación de tres grietas concéntricas principales.
- El módulo de elasticidad del shotcrete es un parámetro de diseño de este material, por lo que es de gran interés observar el efecto de la variación de este parámetro en los resultados de la modelación. En la sección 4.4.1 se realizan tres modelos con distintos módulos de elasticidad; 1592 [MPa], 5000 [MPa] y 10000 [MPa]. En la Figura 4-40 se observa que el aumento del módulo de elasticidad disminuye la deflexión de agrietamiento de forma lineal. El módulo de elasticidad que mejor representa el comportamiento del disco de shotcrete reforzado observado en los datos experimentales es 1592 [MPa].
- La disminución del espesor del disco de refuerzo equivalente afecta principalmente al comportamiento post peak, y específicamente a la pendiente carga – deflexión. Los resultados indican que a menor espesor menor es esta pendiente, acercándose a los resultados experimentales. Este hecho destaca la importancia de considerar en el modelo, el menor espesor para el disco de refuerzo equivalente.

- Al cambiar el tipo de contacto entre las capas de shotcrete y el material de refuerzo equivalente, se observa una flexibilización completa en la curva carga vs deflexión. Considerando el mismo módulo de elasticidad, el agrietamiento se desplaza a una mayor deflexión resultando en una curva que se aleja de los ensayos experimentales. Pese a esto, se logra reducir la pendiente post peak en un 28 %, acercándose a la curva real. Finalmente no se incluye esta característica al modelo definitivo, manteniendo contactos del tipo “bonded”.
- El perfil de deformaciones demuestra que el agrietamiento del disco es incapaz de propagarse con facilidad en el espesor del disco, subiendo tan solo 13 [mm], medida entre el peak de carga y el instante inmediatamente después.
- La reducción de carga observada en los resultados de modelación alcanzan el 40% respecto de la carga en el peak, pero este valor es aproximadamente la mitad de lo que muestran los resultados experimentales. Esta caída es un reflejo de cuánto shotcrete deja de aportar en rigidez al disco, por lo que se concluye que el modelo no logra propagar el deterioro del shotcrete en las tres franjas de agrietamiento.
- El modelo permite representar el comportamiento del shotcrete reforzado, con la limitación de no incluir el daño del refuerzo en el material compuesto. Sin embargo, esto no altera el comportamiento lineal de los materiales, rescatando parámetros relevantes para el diseño de este material, tales como el módulo de elasticidad y el peak de carga.

5.2. DISCUSIÓN

MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL SHOTCRETE

La guía para el shotcrete del código ACI 509-90 menciona la dificultad para establecer propiedades para este material, encontrando módulos de elasticidad y resistencia a la compresión muy variados. Este hecho lo atribuye a la falta de procedimientos de ensayos estándar, variación y gradación, falta de uniformidad en las técnicas de aplicación, la ausencia de ensayos estándar, y la dificultad en correlacionar factores entre especímenes ensayados y núcleos de shotcrete in-situ. (ACI 509-90).

En general, el shotcrete presenta gran durabilidad y adherencia al concreto, albañilería, roca y acero. Entre otras propiedades, cuenta con gran resistencia, baja absorción, buena resistencia a la erosión y ataques químicos, y excelente aislamiento contra incendio. (ACI 509-90)

El código ACI sugiere que el módulo de elasticidad del shotcrete se encuentra entre los 17 y 41 [GPa], similar al concreto convencional. Por otro lado, ensayos experimentales de vigas de shotcrete reforzado (L. Malmgren, 2005) muestran valores que varía entre 12.7 y 26.7 [GPa], parámetro calculado sobre la deflexión en la primera grieta.

En el caso de este trabajo de título, al utilizar la ecuación 3-1 propuesta por Bessali, que relaciona las propiedades del material con la geometría de un disco. En los resultados experimentales obtenidos por Moffat, se obtienen módulos de elasticidad que fluctúan entre los 1 y 2 [GPa], inferior a los valores sugeridos por el código ACI 509-90 y encontrados por L. Malmgren.

Es posible que el valor del módulo de elasticidad para discos de shotcrete reforzado presente tales valores debido a las condiciones del ensayo, considerando que al someter el sistema a flexión, se genere un fenómeno de agrietamiento instantáneo que induzca una pérdida de rigidez imperceptible por los instrumentos de medición.

5.3. INVESTIGACIONES FUTURAS

Para el modelamiento del shotcrete reforzado se recomienda incluir en el software el refuerzo con la geometría real, con su respectivo coeficiente de fricción entre la malla y el shotcrete. Esto permitirá ingresar directamente las propiedades del refuerzo al programa, sin necesidad de encontrar equivalencias a través de la regla de las mezclas. Además, en este estudio, la ley constitutiva del sector de refuerzo equivalente, no permite representar el agrietamiento de la porción de shotcrete. Entonces, al crear la geometría real del refuerzo, se disgregan los materiales completamente, permitiendo al agrietamiento propagarse en el espesor del disco sin problemas.

Se recomienda ensayar probetas a tracción y a compresión del shotcrete a utilizar para obtener las propiedades reales considerando que no se tienen referencias concretas de este material en la bibliografía.

La pendiente post peak en la curva carga deflexión se disminuirá al considerar un modelo con contactos del tipo “frictionless” o sin fricción, en lugar de “bonded” entre el material de refuerzo y el shotcrete. Esto tendrá sentido solo si se logra particionar el modelo en dos, comportándose inicialmente con contactos soldados y a partir del peak de carga, sin fricción.

Dentro del software ANSYS es posible la programación por el usuario de ciertas características comúnmente predefinidas por el programa. Esto se lleva a cabo a través de la creación de rutinas y dentro de sus capacidades se encuentran la creación y modificación de elementos, configuración de nuevos materiales definiendo una ley constitutiva y superficies de falla para tales materiales. Esta opción permitirá al usuario configurar un material capaz de admitir pérdida de carga y posterior recuperación.

CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA

ACI 590-90, Guide to Shotcrete, Reeported by ACI Committee 506.

ANSYS, Mechanical APDL Theory Reference, Release 14.5, ANSYS, Inc.

ASTM C1550, 2012, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel).

Bassali, W.A., 1957. The transverse flexure of thin elastic discs supported at several points, Proc. Cambride Phil. Soc. 53. pp. 728-748.

Baetu, S. y Ciongradi, I. P., 2011, Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete slit walls with ansys. Technical University of Iasi, Faculty of Civil Engineering and Building Services, din Iasi Tomul L VII (LXI), Fasc. 1.

Bernard, E., 2009. Design of fibre reinforced shotcrete linings with macro-synthetic fibres. Proceedings for Underground Support XI, Davos, Switzerland.

Bryan, H., 1999. Engineering Composite Materials. The Institute of Materials, London. pp. 33.

Cengiz, O. y Turanli, L., 2003, Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced Shotcrete in panel test. Cement and concrete research 34 (8), pp. 1357-1364.

Codelco, memoria annual 2012.

Dahmani, L., Khennane, A. and Kaci, S. 2010. Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software, Strength of Materials, Vol 42, No. 2. pp. 232–240.

INE, Boletín marzo de 2013.

Kirsten, H.A.D., 1998, System ductility of long fibre reinforced shotcrete, The Journal of the Southern African Institute Mining and Metallurgy, March/April.

Majó Mayugo y Andreu Joan, 2008. Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria. Capítulo 5.

Malmgren, L., 2005, Interaction between shotcrete and rock, PhD thesis, Lulea University of Thechnology, Sweden.

Moffat R., Herrera R. y Beltrán J. 2013. Comportamiento de shotcrete con refuerzo mediante geosintéticos, Universidad de Chile, Santiago.

Sandoval y Guillen. 2012. Modelamiento numérico aplicado al shotcrete fibroreforzado orientado a la aplicación de las operaciones de minado en CMHSA. Consorcio Minero Horizonte S.A.C., Perú.

Stacey, T. R., Ortlepp, W. D. and Kirsten, H. A. D. 1995. Energy-absorbing capacity of reinforced shotcrete, with reference to the containment of rockburst damage, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, May/June.

Thomas, J., Ramaswamy, A. 2006. Nonlinear analysis of shear dominant prestressed concrete beam using Ansys, Conference No.30 Ansys.

Vasudevan, G., Kothandaraman, S. 2013. Study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ansys by discrete reinforcement modeling, Strength of Materials, Vol. 45. No.2.

ANEXOS

**ANEXO A. DATOS EXPERIMENTALES ENSAYO ASTM C1550-04
LABORATORIO DE SÓLIDOS**

DISCO DE SHOTCRETE SIN REFUERZO

A continuación se presentan los resultados de tres ensayos de discos de shotcrete sin refuerzo. El diámetro de los discos es de 800mm y el espesor del “Disco Shotcrete sin refuerzo 2” es de 65mm, de los discos 1 y 2 no se tiene información.

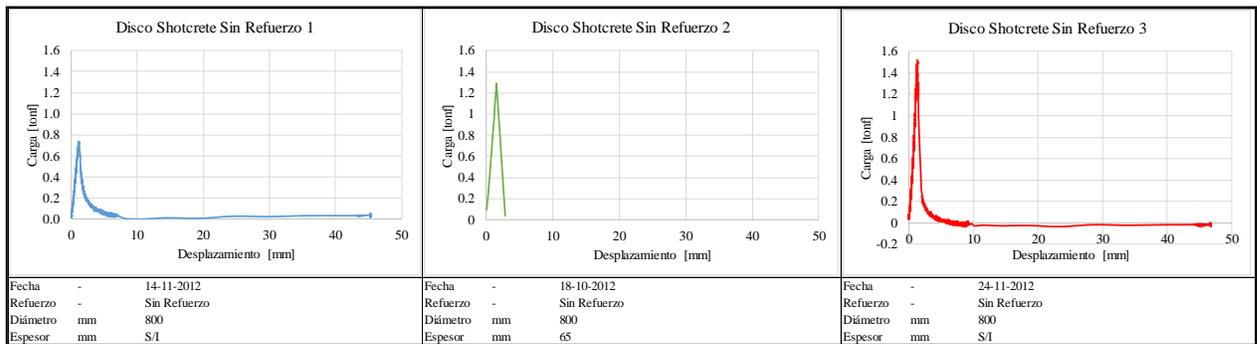


Figura 5: Datos experimentales disco de shotcrete sin refuerzo.

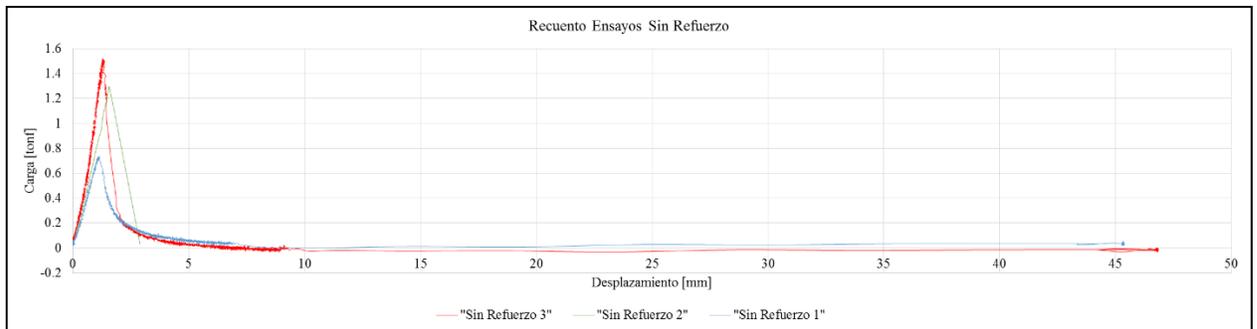


Figura 6: Recuento datos experimentales disco de shotcrete sin refuerzo.

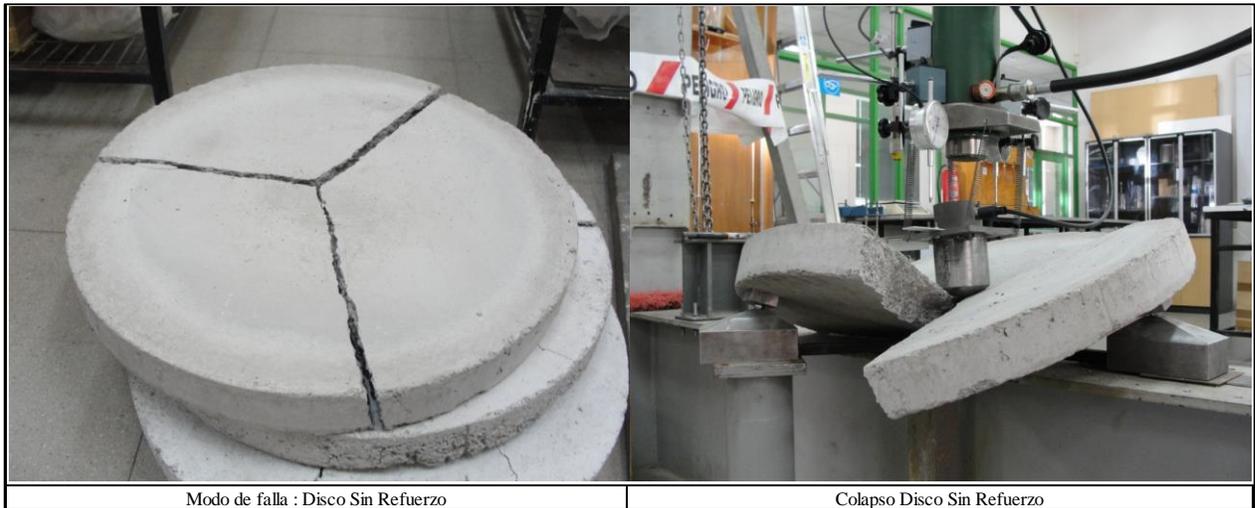


Figura 7: Modo de falla y colapso del disco sin refuerzo.

En la Figura se muestra el modo de falla del disco de shotcrete y el colapso inminente luego de la propagación abrupta de la grieta. Como consecuencia, luego del peak de carga, el sistema es incapaz de resistir la fuerza del pistón y decae rápidamente a cero, como se observa en las Figura y Figura .

DISCOS SIN REFUERZO; VARIACIÓN DEL ESPESOR

En el siguiente set de ensayos, se confeccionaron probetas con distinto espesor, 60 y 80mm, con tal de comparar parámetros de relevancia como el peak de carga y la carga residual.

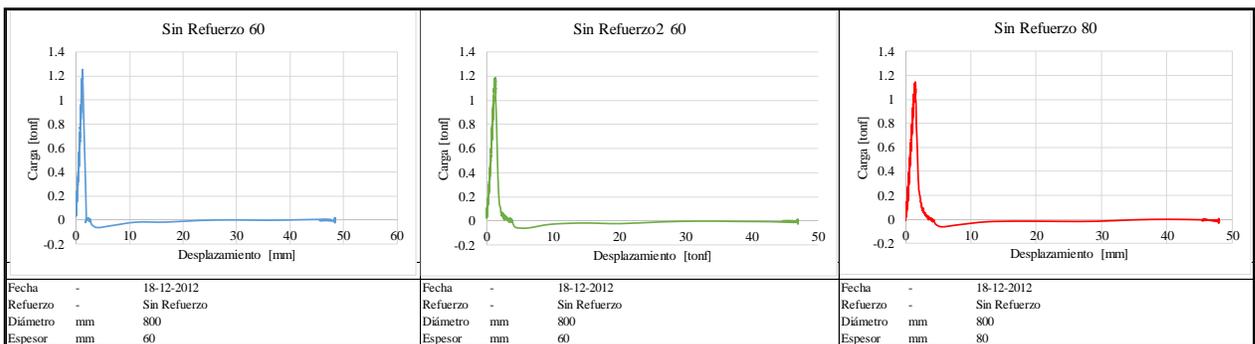


Figura 8: Datos experimentales disco shotcrete sin refuerzo: variación del espesor del disco.

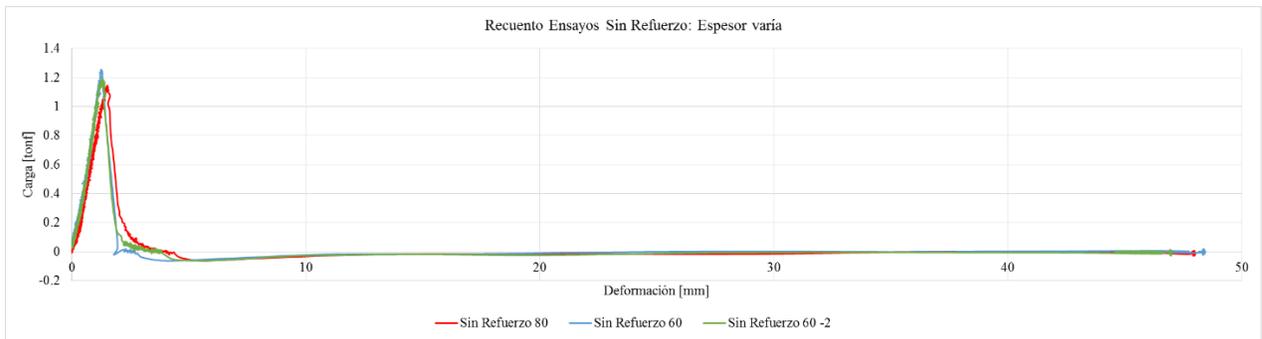


Figura 9: Recuento datos experimentales disco shotcrete sin refuerzo: variación de espesor del disco.

De la Figura y Figura se observa que la variación del espesor en el disco de shotcrete no afecta en gran medida la respuesta de este, induciendo una variación en el peak de carga que no demuestra una tendencia. La deformación máxima del disco de 80mm de espesor es alcanzada a los 0.57 mm, lo cual se traduce en un incremento de 0.2 mm en comparación con los discos de 60mm de espesor. A consecuencia de esto, el disco de mayor espesor presenta una rigidez mayor que los discos de menor espesor.

DISCOS DE SHOTCRETE REFORZADO CON MALLA METÁLICA

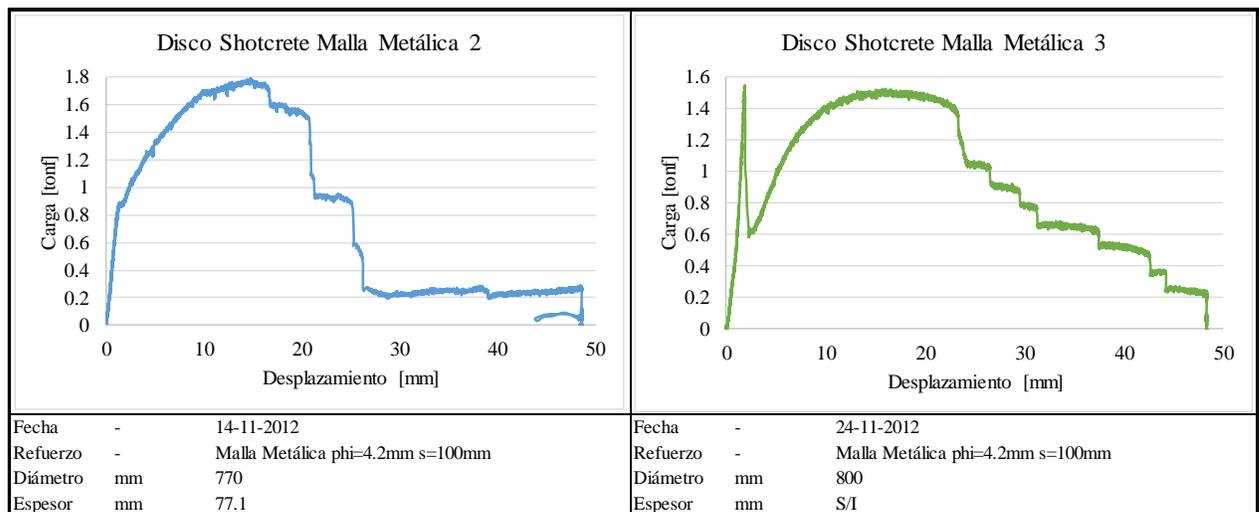


Figura 10: Curva Experimental Disco de Shotcrete con refuerzo Malla Metálica.

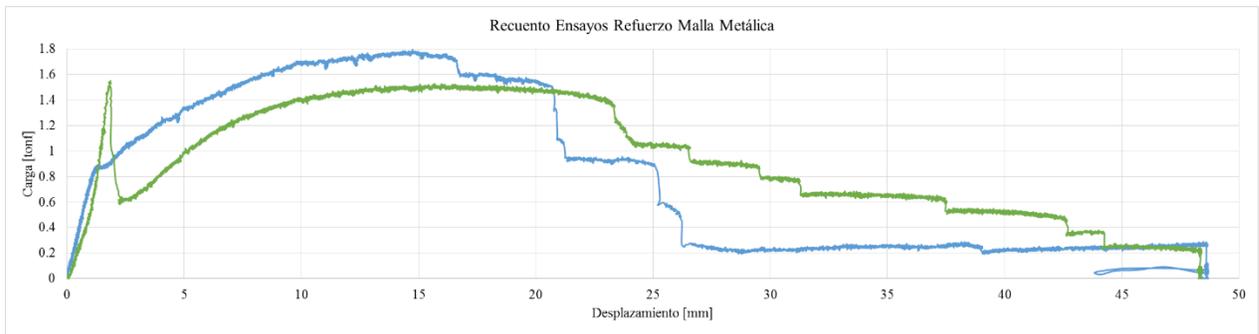


Figura 11: Recuento Datos Experimentales Disco de Shotcrete con refuerzo Malla Metálica.

El efecto de la malla metálica en el disco de shotcrete puede observarse en el Figura luego del peak de carga, caracterizándose por un aumento significativo en la capacidad de resistir carga y de deformarse. El ensayo “Disco de Shotcrete Malla Metálica 3” presenta un peak de carga a diferencia del ensayo “Disco de Shotcrete Malla Metálica 2” debido a que éste experimentó un agrietamiento prematuro, otorgando a la malla la posibilidad de desarrollar su capacidad a menor deflexión.

DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO TX160

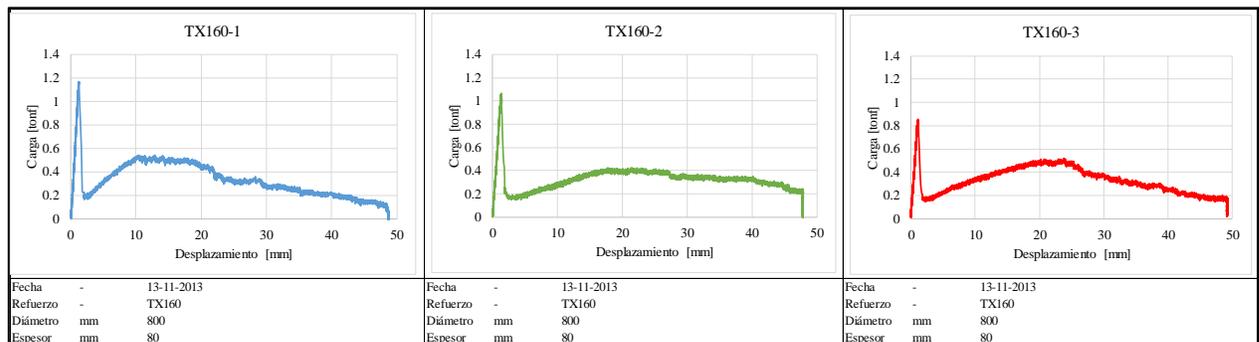


Figura 12: Datos Experimentales Disco Shotcrete Refuerzo Malla TX160.

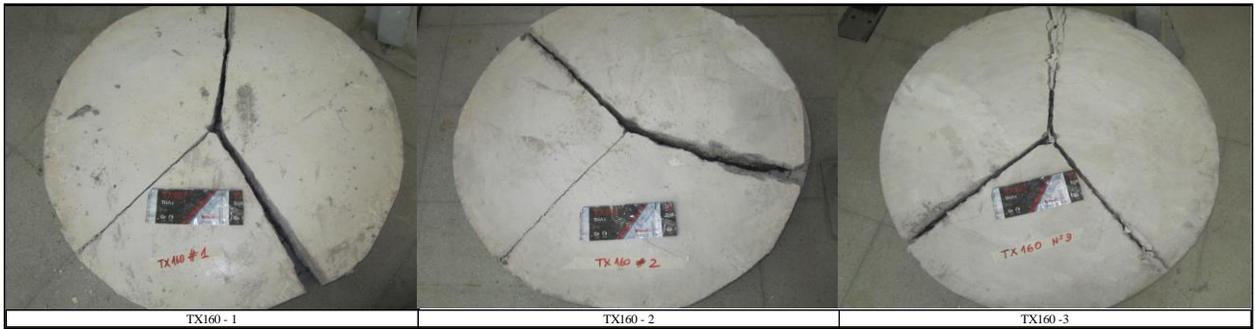


Figura 13: Modo de Falla Datos Experimentales Refuerzo Malla TX160.

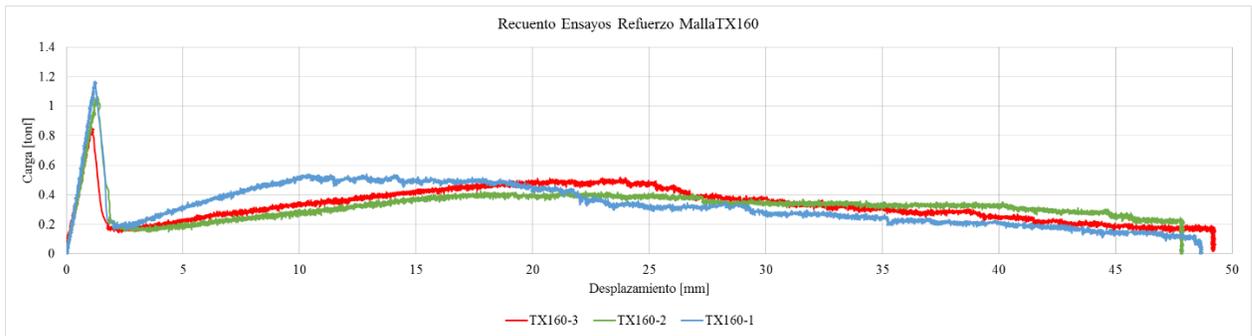


Figura 14: Recuento Datos Experimentales Disco Shotcrete Refuerzo Malla TX160.

DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO MALLA TX196-1

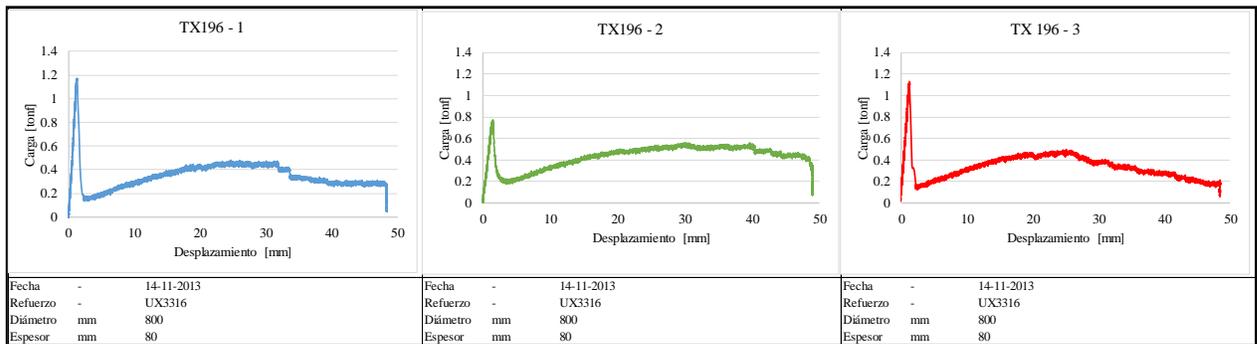


Figura 15: Datos Experimentales Disco Shotcrete Reforzado Malla TX196-1.

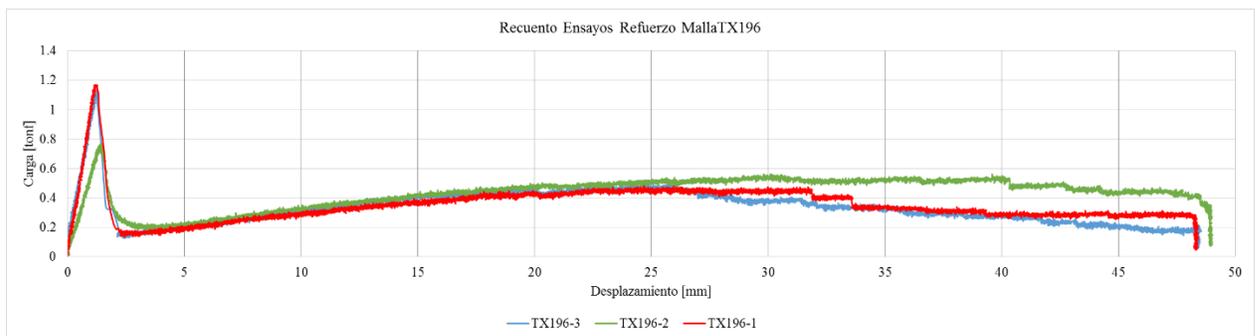


Figura 161: Datos Experimentales Disco Shotcrete Reforzado Malla TX196-1.



Figura 17: Modo de Falla Datos Experimentales Refuerzo Malla TX196-1.

DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO TX196-2

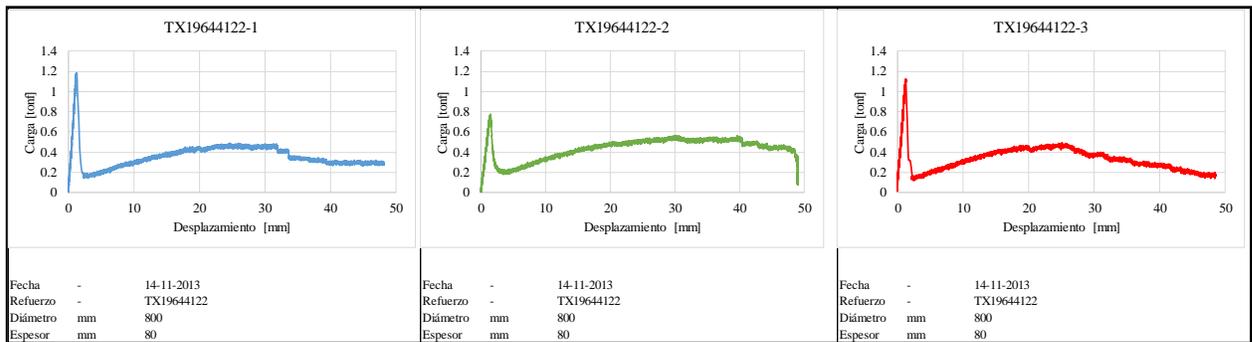


Figura 18: Datos Experimentales Disco Shotcrete Refuerzo Malla TX196-2.



Figura 19: Modo de Falla Datos Experimentales Refuerzo Malla TX196-2.

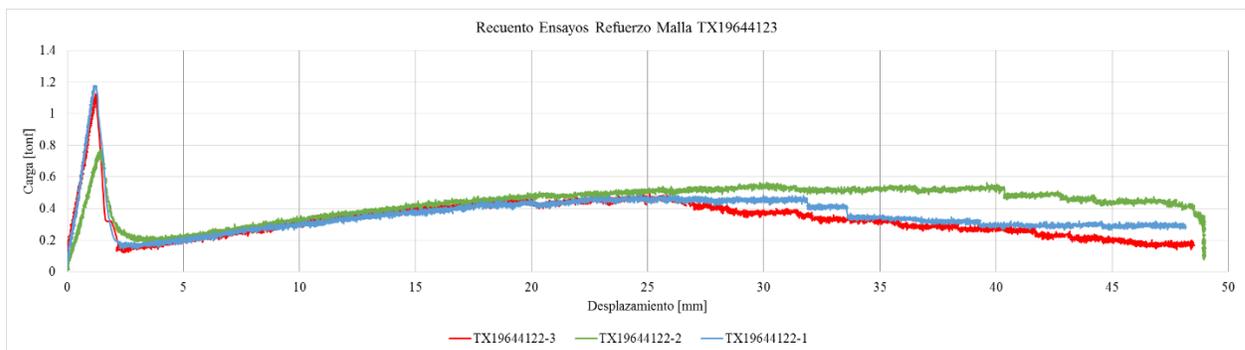


Figura 20: Recuento Datos Experimentales Disco Shotcrete Malla TX196-2.

DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO MALLA UX3340

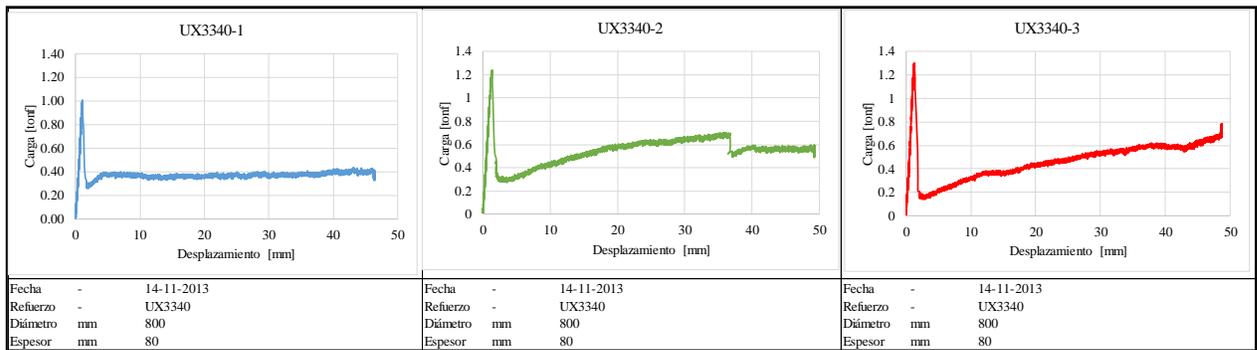


Figura 21: Datos Experimentales Disco Shotcrete Malla UX3340.

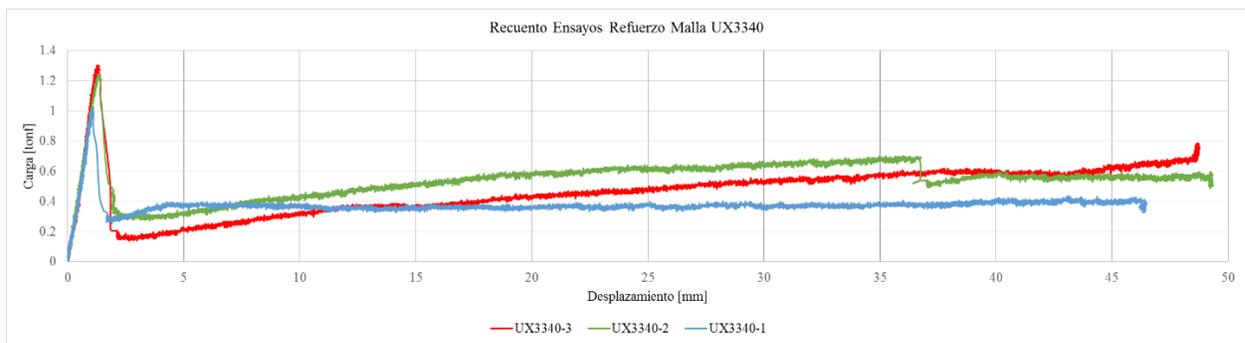


Figura 22: Recuento Datos Experimentales Disco Shotcrete Refuerzo Malla UX3340.

DISCO DE SHOTCRETE REFORZADO MALLA UX3316

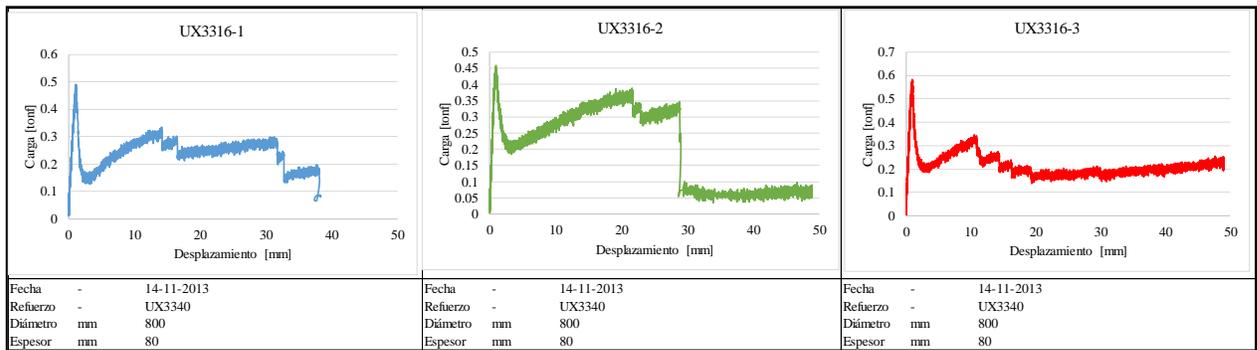


Figura 23: Datos Experimentales Disco Shotcrete Refuerzo UX3316.

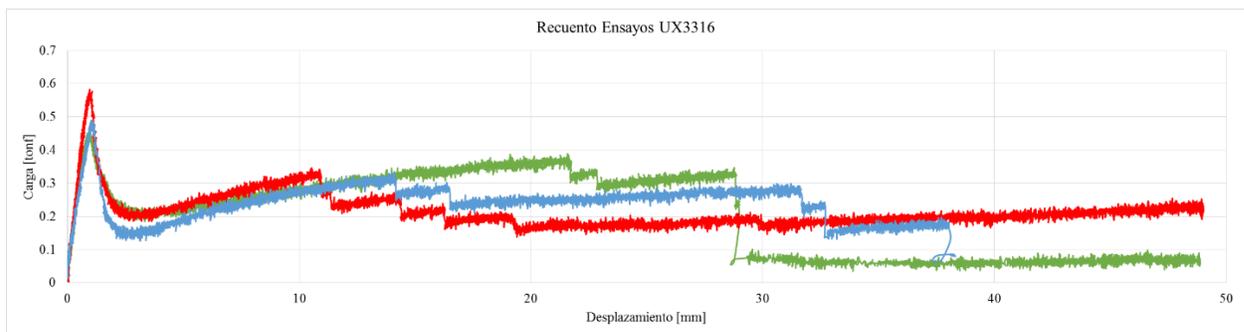


Figura 24: Recuento Datos Experimentales Disco Shotcrete UX3316.