



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EFFECTO DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN BARRAS DE REFUERZO SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE FOTOGRAMETRÍA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VANIA PAZ ALVARADO FUENTES

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
RODRIGO ASTROZA EULUFÍ

Este trabajo ha sido financiado:
FONDECYT REGULAR N°1200277

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL

POR: VANIA PAZ ALVARADO FUENTES

FECHA: 2024

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

**EFFECTO DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN BARRAS DE REFUERZO
SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS UTILIZANDO EL MÉTODO DE
FOTOGRAMETRÍA**

La corrosión del acero de refuerzo deteriora las estructuras de hormigón armado, aumentando su vulnerabilidad y, por tanto, haciéndolas proclive al daño cuando son sometidas a demandas sísmicas. En este trabajo, se investiga el comportamiento barras de refuerzo sujetas a corrosión acelerada que son consecuentemente ensayadas en forma cíclica en la maquina universal de la Universidad de Chile. Se utiliza un protocolo de cargas cíclicas asimétricas (inferidas de demandas sísmicas) y barras de calidad A630-420H corroídas entre un 10 y un 40% (de su peso) mediante una técnica de corrosión acelerada del tipo uniforme y realizada en dependencias de la Universidad de los Andes. Se emplean e implementan técnicas de fotogrametría para capturar la respuesta cíclica de barras corroídas de diferentes planos para capturar deformaciones por pandeo 3D y estudiar la distribución de deformaciones que la barra experimenta, empleando un patrón de puntos de control a lo largo de la barra.

A través de simulaciones numéricas con modelos de elementos finitos en OpenSees y empleando elementos tipo barra con plasticidad distribuida y considerando una transformación corrotacional para incluir el efecto de equilibrio en grandes deformaciones y en consecuencia su respuesta a pandeo, se ajustan los parámetros del modelo constitutivo de Giuffrè-Menegotto y Pinto a los datos experimentales de barras de diversos diámetros, relaciones de aspecto L/D y niveles de corrosión, pudiendo obtener un ajuste adecuado que permite concluir que el parámetro más relevante (como era de esperarse) se relaciona al diámetro efectivo de la barra.

Se emplea un escáner 3D para medir la geometría superficial de las barras corroídas. Con dicha geometría se realiza un modelo tridimensional en elementos finitos desarrollado en ANSYS que revela que la forma irregular de las secciones transversales de las barras corroídas influye significativamente en su dirección de pandeo y su respuesta no lineal. De igual forma, se comprueba que al emplear la misma ley constitutiva (de Chaboche) se puede ajustar en forma certera la respuesta de barras de diversas dimensiones o relaciones de aspecto.

Palabras-Clave: corrosión, acero de refuerzo, cargas cíclicas, fotogrametría, pandeo, elementos finitos, escáner 3D

AGRADECIMIENTOS

Quiero mediante estas palabras agradecer a todas las personas involucradas de una u otra forma en mi proceso de formación profesional. Le agradezco inmensamente a mis padres, Jaime y Clara, quienes siempre se han preocupado de apoyarme y ayudarme en los momentos difíciles de esta travesía, muchas gracias por todos los esfuerzos y sacrificios que han hecho por mis hermanos y por mí. También, les agradezco sinceramente a mis hermanos, que siempre han estado apoyándome y han creído en mí capacidad para lograr esto y más. A mis abuelos y tía, por siempre estar conmigo en este proceso y cuidarme. Los quiero mucho a todos.

Agradezco también a las amistades que formé en esta etapa, gracias a ustedes por todo lo compartido, las tardes - noches de estudio, los juegos de ping-pong, los almuerzos, las risas y también por su apoyo y por confiar en mí. Le agradezco también mis amigas de la vida, que también han estado ahí, gracias por todas las salidas y viajes.

Quiero agradecer también a mi pareja, Franco, mi compañero, gracias por todo el apoyo en esta etapa.

Finalmente, quiero agradecer a todos los profesores con quienes tuve la oportunidad de aprender como también de participar como ayudante de sus cursos. Al profesor Francisco Hernández, muchas gracias por su compromiso y vocación como profesor de la U, por su apoyo, paciencia y por todos los consejos en esta etapa de cierre. Le deseo el mejor de los éxitos en esta nueva etapa.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	CORROSIÓN ACELERADA DE BARRAS DE REFUERZO	7
3	TRABAJO EXPERIMENTAL	8
4	PROTOCOLO DE DEFORMACIONES	11
4.1	CONFIGURACIÓN DE ENSAYO.....	12
4.2	ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	14
5	RESULTADOS	15
5.1	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y DEFORMACIONES.....	15
5.2	CALIBRACIÓN MODELOS OPENSEES	17
5.3	MODELOS 3D EN ANSYS APDL- Workbench	23
6	CONCLUSIONES.....	29
7	BIBLIOGRAFÍA	32
	ANEXOS.....	35
	ANEXO A.....	35
	ANEXO B.....	37
	ANEXO C	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Barras de acero de refuerzo A630-420H ensayadas según su diámetro, relación L/D	9
Tabla 2. Barras de acero de refuerzo ensayadas y diámetros promedio medido.	35
Tabla 3. Valores de parámetros calibrados con modelo OpenSees (Steel02).	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Diagrama de celda de corrosión. (b) Configuración experimental de celda de corrosión [44]	8
Figura 2 – (a) Relación real de pérdida de masa vs. Relación nominal de pérdida de masa objetivo. (b) Diámetro corroído vs. Relación real de pérdida de masa.	10
Figura 3 - Protocolo de deformaciones SH1-L [2]. (a) Protocolo de deformaciones SH1-L.	11
Figura 4 - Vista esquemática de la distribución de cámaras para fotogrametría (izquierda) y barras de acero de refuerzo corroídas ensayadas (derecha).	12
Figura 5 - Imágenes procesadas para tiempo inicial y tiempo $t > 0$. Arriba: (a) y (b): Barra con $L/D=4$ y corrosión del 15%. Abajo: (c) y (d): Barra con $L/D=12$ y corrosión del 15%.	13
Figura 6 – Imágenes procesadas con puntos encontrados (azul), zona de búsqueda (amarillo), líneas de contorno (verde), central (negro) y línea media (rojo) para distintas relaciones de L/D para vista de cámara 1.	14
Figura 7 – Deformaciones verticales entre puntos adyacentes a lo largo de barra de acero de refuerzo corroída. Barra con 8 puntos identificados desde arriba hacia abajo (1 arriba y 8 abajo) con identificación de puntos en barra ensayada.	16
Figura 8 – Deformaciones verticales entre puntos adyacentes a lo largo de la barra de acero de refuerzo corroída. Barra con 30 puntos identificados desde arriba hacia abajo (1 arriba y 30 abajo) con identificación de puntos en barra ensayada.	17
Figura 9 - Modelo constitutivo Giuffrè Menegotto Pinto (GMP) [2]	18
Figura 10 – Curvas de Tensión vs. Deformación Experimentales vs. Calibradas en OpenSees.	19
Figura 11 – Ajuste de parámetros de modelo Steel 02 y diámetro de barra de refuerzo. Los colores representan los diámetros nominales: Azul – 8 mm; Verde – 10 mm; Rojo – 12 mm; Celeste – 16 mm.	20
Figura 12 – Ajuste de parámetros de modelo Steel 02 y diámetro de barra de refuerzo. Los colores representan los diámetros nominales: Azul – 8 mm; Verde – 10 mm; Rojo – 12 mm; Celeste – 16 mm.	21
Figura 13 – Análisis de sensibilidad en barras de acero corroídas con diámetro de 10 mm	22
Figura 14 – (a) Einscan Pro 2X Plus junto a plataforma fija accesoria con barra corroída. (b) Geometría escaneada con EXScan Pro. (c) Reparación y llenado de barra corroída en Fusión 360. (d) Suavización y corte de barra corroída en Spaceclaim. (e) Mallado de barra corroída en ANSYS APDL-Workbench. (f) Condiciones de desplazamiento	

y empotramiento en ANSYS Workbench. (g) Resultados de modelo con ANSYS APDL-Workbench.	24
Figura 15 – Línea del tiempo modelo ANSYS y niveles de deformación plástica.....	25
Figura 16 – Curvas Tensión Deformación Modelo 3D vs. Experimental con parámetros del material de	26
Figura 17 – Comparación de deformaciones ANSYS vs Experimental y deformaciones plásticas.	26
Figura 18 – Comparación de deformaciones ANSYS vs Experimental y deformaciones plásticas.	27
Figura 19 – Modelo constitutivo de Chaboche y parámetros de Chaboche[43].	28
Figura 20 – Tensión de Von Mises ANSYS Workbench y longitud de pandeo del modelo KL con $K=0.5$	28
Figura 21 – Sincronización de los tiempos de fotogrametría con el tiempo de la máquina universal para barra de diámetro	41

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el diseño sísmico basado en el desempeño ha surgido como un punto de foco, donde se han realizado grandes esfuerzos en el desarrollo de modelos de Elementos Finitos (FE) capaces de capturar de manera más precisa el comportamiento no lineal de las estructuras y sus componentes sometidos a excitaciones sísmicas [1]. Un aspecto crucial de este enfoque implica asegurar una representación precisa de la respuesta no lineal de los materiales estructurales, ya que los modelos constitutivos de estos materiales influyen significativamente en la respuesta no lineal a nivel global y local[2]. Según Kashani et al. [3], la precisión de los modelos de Elementos Finitos depende en gran medida de la exactitud de los modelos constitutivos de los materiales, siendo vital la correcta modelación de las barras de acero para el caso de las estructuras de Hormigón Armado (HA).

En dicho contexto, OpenSees [4] ofrece múltiples modelos de materiales uniaxiales de código abierto para simular barras de acero de refuerzo de HA. Algunos de ellos pueden modelar la respuesta cíclica pero no son capaces de modelar directamente el efecto del pandeo local, como el material Steel01 desarrollado por Filippou, el material Steel02 [5] - modelo Giuffré-Menegotto-Pinto (GMP) con endurecimiento isotrópico, el material Steel04 con endurecimiento cinemático e isotrópico combinado, el material de acero de Dodd-Restrepo [6], el material de acero Ramberg-Osgood [7], SteelMPF [8] y el material UVCunial [9]. En general, estos modelos son precisos al usar un elemento de viga con una relación longitud-diámetro (L/D) inferior a cinco, donde el pandeo puede ser considerado como despreciable.

Por otro lado, OpenSees ofrece modelos de materiales uniaxiales que pueden incluir pandeo elástico o inelástico, como el Material de Refuerzo de Acero implementado por Jon Mohle y Sashi Kunnath [10]. El Material de Refuerzo de Acero incluye pandeo basado en el modelo de Gomes y Appleton [11], donde se asume tres bisagras plásticas concentradas que describen su respuesta inelástica al pandeo, o el modelo de Dhakal y Maekawa [12,13]. Del mismo modo, el modelo de material Steel05 implementado por Mesa y Massone [14] también puede incluir pandeo mediante una formulación no iterativa simplificada de un modelo iterativo de 4 bisagras plásticas sugerido la investigación de Massone y Moroder [15]. En general, estos modelos de materiales utilizan parámetros de entrada relacionados con el material de acero en sí, y otros relacionados con los modelos de pandeo inelástico como la esbeltez de la barra de refuerzo y el límite elástico.

Se han realizado múltiples estudios relacionados con las barras de acero de refuerzo sometidas a ensayos monocíclicos o cíclicos, incluidos, por ejemplo, los realizados por Bayrak & Sheikh [16], Cosenza & Prota [17] y Bae et al. [18]. Estos investigadores han examinado el comportamiento de las barras de acero de refuerzo de HA bajo compresión en diversas condiciones de esbeltez, excentricidades y propiedades mecánicas. En general, se observa comúnmente que el comportamiento a compresión está descrito por el pandeo inelástico para valores comunes de esbeltez ($4 < L/D < 20$), lo que implica que la resistencia a la fluencia (f_y) está directamente relacionada con la resistencia al pandeo y su deformación lateral. Para una relación longitud-diámetro superior a veinte, la respuesta a compresión de las barras de acero se caracteriza por el pandeo elástico.

La corrosión de las barras de acero de refuerzo es un fenómeno natural y la causa más común de deterioro en las estructuras de hormigón armado, lo que también conlleva costos económicos significativos relacionados con el mantenimiento de infraestructuras expuestas a este fenómeno [19]. Existe una amplia literatura que describe el mecanismo de corrosión inducida por carbonatación y cloruro en las estructuras de HA [20]. En general, el proceso de corrosión se puede clasificar como corrosión uniforme o general, corrosión por picaduras, corrosión galvánica, corrosión en hendiduras, corrosión intergranular, corrosión por grietas bajo esfuerzo, corrosión por erosión y corrosión microbiana. Las estructuras de HA sometidas a cargas cíclicas, ya sea por terremotos, viento o máquinas vibratorias, se vuelven más vulnerables si las barras de acero de refuerzo están corroídas por alguno de estos mecanismos, aumentando la vulnerabilidad y provocando que las estructuras sean más propensas a la fractura en comparación con estructuras sin degradación [21].

Según Bertolini et al. [22], el deterioro causado por la corrosión en las estructuras de HA se puede dividir en dos etapas. La primera etapa implica la intrusión de agentes corrosivos, como cloruros que ingresan al hormigón y se acumulan en la superficie de las barras de refuerzo hasta niveles críticos, lo que resulta en la degradación de la capa de protección pasiva proporcionada por el hormigón. La segunda etapa ocurre cuando hay daños localizados en la capa pasiva, conocida como etapa de propagación, que puede llevar a la pérdida de área de sección transversal, formación de grietas y fracturas en el hormigón, lo que finalmente conduce al colapso de la estructura. Dado este contexto, resulta de interés estudiar y corroborar el efecto de la corrosión en las barras de acero de HA sometidas a cargas cíclicas características de los terremotos, para entender cómo el fenómeno de la corrosión afecta su rendimiento sísmico.

Uno de los desafíos principales del estudio de la corrosión radica en el factor tiempo, ya que este fenómeno demanda un período prolongado para su desarrollo completo. En este contexto, la corrosión natural de las barras de acero dependerá de las condiciones ambientales (como entornos marinos, contaminación industrial, carbonatación y presencia de cloruro, entre otros), que tienen un impacto profundo en la extensión de la degradación y su evolución con el tiempo. En este estudio, se aplica corrosión acelerada a la barra de acero de refuerzo de HA para generar niveles variables de corrosión uniforme (Sección 2) que se aplicarán a barras con diferentes diámetros y valores de esbeltez.

En investigaciones anteriores, se ha demostrado que se genera una degradación significativa de las propiedades mecánicas de las barras de acero de refuerzo de HA cuando aumenta el nivel de corrosión [20,23–25]. En este contexto, estudios disponibles en la literatura sobre este tema; por ejemplo, Vanama y Ramakrishnan [20] resumen más de 45 estudios experimentales relacionados con la estimación de propiedades de tracción de barras de acero de HA corroídas entre los años 2002 y 2018, mostrando que hay múltiples estudios centrados en la corrosión uniforme o corrosión local. Algunos estudios emplean barras de acero naturalmente corroídas extraídas de estructuras de hormigón armado HA envejecidas en entornos de cloruro o carbonatación, construcciones no terminadas o también barras corroídas naturalmente que se guardaron en depósitos de materiales (corrosión natural). En general, se ha observado comportamientos similares de las barras de acero ya sea con procesos de corrosión artificiales como naturales [26].

De esta manera, se admite que la corrosión afecta negativamente la resistencia a la tracción de las barras de acero de refuerzo debido a la reducción de su área de sección transversal a causa de la formación de óxido. La corrosión comúnmente resulta en una pérdida significativa de ductilidad en las barras de acero. Esto significa que las barras corroídas tienen más probabilidades de fracturarse repentinamente porque su deformación última se reduce significativamente en comparación con las barras sin efectos de corrosión. Este comportamiento frágil puede reducir drásticamente la resistencia sísmica de las estructuras.

En este contexto, se han sugerido relaciones de degradación en la literatura [20,25–27] que describen la influencia del nivel de corrosión (para corrosión uniforme y por picaduras) en las propiedades mecánicas de las barras de acero de refuerzo. Estas leyes de degradación empíricas describen la reducción de la resistencia a la fluencia (f_y), la resistencia última a la tracción (f_u) y la deformación última (ϵ_u) como función de la relación real de pérdida de masa (γ). Cabe destacar que

las relaciones de degradación para f_y y f_u se han determinado principalmente utilizando el área de sección nominal, es decir, el área inicial no corroída. Los autores también han mostrado resultados gráficos considerando el área efectiva, que se infiere de su peso corroído o según el diámetro medido antes de realizar las pruebas mecánicas. Vale la pena señalar que algunos estudios [26,27] también sugieren que el módulo elástico de Young (E) puede degradarse por la corrosión; sin embargo, los datos de prueba no muestran variaciones perceptibles en la pendiente inicial de esfuerzo-deformación. Cabe señalar que estas relaciones de degradación se han determinado principalmente a partir de resultados experimentales obtenidos de ensayos de tracción de barras de acero de HA corroídas uniformemente [20,25,26,28–30], y otros estudios también se centran en la corrosión localizada o por picaduras [26,27]. Además, se han realizado ensayos de baja fatiga [31,32] utilizando barras de acero con una relación longitud-diámetro o esbeltez de seis (es decir, $L/D=6$), mostrando un pandeo limitado para barras corroídas, cuyos resultados de investigación se centraron en la reducción de la energía absorbida generada por la corrosión.

En el presente trabajo de investigación, nos centramos en analizar la respuesta de barras de acero de refuerzo HA corroídas sometidas a ensayos cíclicos irregulares de gran deformación. Por tanto, el objetivo principal es calibrar los parámetros del modelo Steel02 [5] - Giuffré-Menegotto-Pinto (GMP) para barras de acero de refuerzo de HA con distintos niveles de corrosión. Este modelo se emplea ampliamente en la literatura y la práctica para modelar marcos de acero y barras de refuerzo, debido a su alta precisión, eficiencia computacional, curva de transición suave, inclusión del efecto Bauschinger y el número reducido de parámetros que varían en un rango razonable. Para lograr esto, se empleará el protocolo asimétrico de carga cíclica SH1-L que fue utilizado por Carreño [36] para realizar ensayos en barras de acero de refuerzo HA (Sección 3.1), teniendo en cuenta que las deformaciones cíclicas asimétricas son protocolos más desafiantes para evaluar la respuesta cíclica de las barras de acero de HA, considerando que las barras experimentan deformaciones remanentes asimétricas entre los distintos sub-ciclos de tracción y compresión. En este contexto, Birrell et al. [2] pudieron calibrar los parámetros de GMP utilizando un procedimiento bayesiano para simular datos experimentales recopilados por Carreño en OpenSees [4]. Este protocolo se aplica a barras de acero de refuerzo de calidad A360-420H fabricadas por Aceros CAP Chile, las que fueron previamente sometidas a corrosión uniforme (Sección 2).

Se realizaron ensayos cíclicos en barras de acero de refuerzo con niveles de corrosión que van desde un 10% hasta un 40%. Además, se analizaron diámetros de 8, 10, 12 y 16 mm y relaciones longitud-diámetro $L/D=4,8,12,15$. Para modelar el pandeo inelástico en OpenSees [4], se emplea

el enfoque basado en fibras sugerido por Kashani et al. [3,37,38]. Es decir, el pandeo inelástico se modelará utilizando varios elementos `forceBeamColumn` con una sección basada en fibras (con material GMP) y transformación corotacional. Cabe destacar que Kashani et al. [3,37,38] han validado la precisión de la simulación en barras de acero de refuerzo con corrosión por picaduras no uniforme sometidas a carga cíclica y carga compresiva monótona. Para simular el pandeo de barras de acero de refuerzo corroídas, Kashani et al. [3,37,38] emplean una sección rectangular equivalente que se ajusta a la sección transversal y al momento de inercia mínimo, que se calculan a partir de datos de medición óptica. Además, los autores modelan la excentricidad de las barras desplazando el centroide de cada sección de la barra corroída, uniendo las secciones con enlaces rígidos. Cabe señalar que Kashani et al. [3,37,38] también verifican si el modelo de Dhakal y Maekawa [12,13] se puede utilizar para barras corroídas modificando el parámetro de pandeo no dimensional de la barra y el límite elástico para tracción y compresión de acuerdo con ecuaciones calibradas a partir de resultados experimentales. Sin embargo, Kashani et al. [3,37,38] observaron que el Material de Refuerzo Uniaxial disponible en OpenSees no era preciso para tener en cuenta la influencia del pandeo inelástico en la degradación del modelo histérico. Por esta razón, Kashani et al. [3] sugirieron un modelo fenomenológico que simula mejor la respuesta histórica de barras de acero de refuerzo con y sin deterioro por corrosión.

En el presente trabajo se ajustaron los parámetros GMP y el diámetro efectivo empleados con un modelo basado en fibras y mediante técnicas de optimización tradicionales para igualar los datos experimentales de los ensayos experimentales realizados en las barras con corrosión uniforme. A partir de los resultados y el análisis de sensibilidad, se concluyó que el diámetro efectivo es el parámetro más relevante en el ajuste. Esto significa que los parámetros GMP se pueden considerar invariables si se emplea un diámetro efectivo adecuado. Como resultado, se realizó una segunda optimización para ajustar los datos experimentales, donde los parámetros GMP permanecen inalterados y donde solo se optimizó el diámetro efectivo, encontrando una buena coincidencia para todos los resultados experimentales (utilizando una sección circular que permite igualar las ramas de tracción y compresión con pandeo inelástico). En otras palabras, se sugiere que las propiedades mecánicas del material de acero no se modifican significativamente (como sugiere la literatura común), y la reducción efectiva del diámetro de la sección transversal por sí misma puede dar cuenta del efecto de la corrosión. Cabe señalar que se sugieren relaciones empíricas que describen el diámetro efectivo como función del nivel de corrosión (es decir, el parámetro de pérdida de masa o el diámetro registrado en el estado de corrosión).

Un aspecto importante observado durante las pruebas de barras corroídas sometidas a pruebas cíclicas regulares o irregulares es que la barra puede experimentar desplazamiento relativo en las mordazas de sujeción de la máquina universal debido a su superficie de contacto irregular. Esto implica que el desplazamiento relativo registrado por la máquina universal se vuelve poco confiable. De manera similar, los extensómetros también son inexactos porque la superficie irregular de las barras corroídas puede generar una conexión no fija y porque las barras experimentan pandeo inelástico que genera una distribución no uniforme de las deformaciones longitudinales a lo largo de la barra. Esto implica que un extensómetro ofrece una lectura de la deformación promedio entre dos puntos intermedios dentro de la barra que no está relacionada con la deformación promedio experimentada a lo largo de toda su longitud.

En este contexto, las deformaciones longitudinales se registraron mediante la técnica de fotogrametría que se implementó (Sección 4.1, 4.2 y 5.1) en diferentes planos de las barras, permitiendo visualizar la deformación 3D de las barras de acero generada por el pandeo inelástico. Además, se emplearon múltiples puntos de seguimiento a lo largo de las barras para evaluar la distribución no uniforme de la deformación longitudinal observada cuando la barra experimentaba el ensayo cíclico. La implementación de esta técnica permitió analizar el efecto de la corrosión en la distribución de la deformación longitudinal a lo largo de la barra para diferentes niveles de corrosión y diferentes diámetros.

Basándose en investigaciones pasadas, la disminución de las propiedades mecánicas abarca parámetros adicionales que afectan en estas magnitudes, entre ellas se encuentra la no uniformidad en las propiedades de las barras de acero corroídas o el desplazamiento del centro de gravedad debido a la pérdida de masa en el cuerpo de forma irregular [39]. Además, se ha demostrado que la corrosión provoca una distribución no uniforme de las áreas de sección transversal a lo largo de la longitud de la barra [40].

Considerando que la geometría de las barras de acero corroídas y que sus secciones transversales a través de su largo no son uniformes debido al mismo fenómeno de corrosión, en el presente estudio se utilizó tecnología 3D, siguiendo la línea investigativa mediante modelos de elementos finitos [22]. Así, con el uso de un escáner 3D modelo Einscan Pro Plus 2X de Shining 3D [41] proporcionado por la Universidad de los Andes de Chile, se realizaron escaneos a un grupo acotado de barras de acero de refuerzo de HA, con la finalidad de estudiar su topografía superficial real y junto a los resultados de la fotogrametría en términos globales como locales, se realizan modelos

de elementos finitos detallados, donde se calibrará el modelo constitutivo de Chaboche disponible en ANSYS Workbench [42, 43], facilitando un análisis detallado de la respuesta local de los elementos. Se observa que el límite de rendimiento debe ajustarse de acuerdo con el nivel de corrosión y la optimización del diámetro efectivo.

En resumen, el objetivo principal de esta investigación es estudiar el comportamiento cíclico de barras de acero de HA corroídas sometidas a protocolos de carga asimétrica y, en consecuencia, evaluar la capacidad de simulación de OpenSees [4] para prever la respuesta de barras de acero corroídas a nivel material y de pandeo. Además, se pretende discutir la influencia de la corrosión en el comportamiento no lineal de las barras de acero de HA, considerando la respuesta asimétrica, la relación entre los parámetros de GMP y el diámetro efectivo y la influencia del fenómeno de la corrosión en la deformación longitudinal distribuida en la barra.

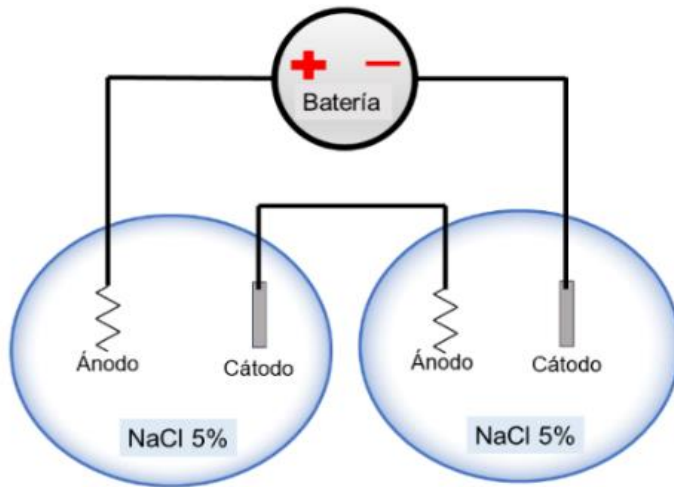
2 CORROSIÓN ACELERADA DE BARRAS DE REFUERZO

La corrosión es un proceso natural asociado a una reacción electroquímica capaz de deteriorar el material expuesto como también sus propiedades mecánicas. En un ambiente agresivo, donde la velocidad de corrosión es rápida, se requiere de años para obtener un grado de corrosión moderado en barras de refuerzo, por lo cual, para estudiar este fenómeno, se vuelve fundamental utilizar técnicas artificiales que aceleren el proceso de corrosión [44].

En la presente investigación, se utilizó el método de corrosión acelerada para inducir la corrosión. Esto permite obtener barras de acero de refuerzo con distintos grados de corrosión en un plazo de tiempo controlado. Para esto, se utilizaron barras de acero de refuerzo de 8, 10, 12 y 16 mm de diámetro y se consideraron las relaciones de largo sobre diámetro de: 4, 8, 10, 12 y 15.

El método de corrosión acelerada se implementó en el laboratorio de la Universidad de los Andes, Chile. La corrosión acelerada uniforme se realiza a través de una celda de corrosión, que se caracteriza por tener una fuente de alimentación de donde se obtiene la corriente eléctrica que provoca la corrosión en las barras de acero de refuerzo, para esto se utilizó una batería que generó una intensidad de 2 mA/cm^2 , también un ánodo, donde ocurre la corrosión, en este caso se utilizaron las barras de acero de refuerzo como ánodo. Por otro lado, se tiene un cátodo, que permite completar la celda. Los principales materiales que se utilizan como cátodo son el cobre, el acero inoxidable y el acero al carbono regular [44]. En este caso, se utiliza acero inoxidable, por su resistencia a la corrosión. Se utiliza una solución de agua destilada con sal pura al 5% que se deposita en 2 contenedores de PVC como medio conductor que da paso al flujo de corriente eléctrica entre el ánodo y

cátodo. Para que el circuito funcione, se realizan las conexiones eléctricas entre la fuente de alimentación, ánodo y cátodo formándose el circuito que se observa en la Figura 1.



(a)

(b)

Figura 1 – (a) Diagrama de celda de corrosión. (b) Configuración experimental de celda de corrosión [44]

Para estimar el tiempo necesario que provoca la pérdida de masa propuesta, se utiliza la ley modificada de Faraday [37]. Luego de someter las barras de acero de refuerzo a la celda de corrosión, se realiza un proceso de limpieza para eliminar los residuos de material corroído que queda como resultado del proceso, empleando la técnica de lijado.

Finalmente, se realiza las mediciones y cálculo de grado de corrosión para lo cual se compara la masa inicial y masa final de las muestras, obteniendo a partir de ambas magnitudes el grado o nivel de corrosión de la probeta. Los niveles de corrosión considerados van desde un 10% de corrosión hasta un 40%.

3 TRABAJO EXPERIMENTAL

Los ensayos experimentales fueron realizados en el laboratorio experimental de estructuras (LEE) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile en una máquina universal INSTRON Modelo 600LX de una capacidad máxima de 60 toneladas y de 30 toneladas para realizar ensayos de carga cíclica. El grupo de ensayos abarcó 40 barras de acero de refuerzo de acero CAP A630-420H con distintos grados de corrosión, diámetro nominal y relación de aspecto L/D, las cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Barras de acero de refuerzo A630-420H ensayadas según su diámetro, relación L/D y la fracción de pérdida de peso por corrosión.

Diámetro [mm]	L/D [-]			
	4	8	12	15
8	15, 20, 30, 40 [%]		10, 15, 30, 40 [%]	
10	15, 20, 30, 40 [%]	20, 30, 40 [%]	10, 15, 30, 40 [%]	20, 30 [%]
12	10, 15, 20, 30, 40 [%]		10, 15, 20, 30, 40 [%]	
16	10, 15, 20, 30, 40 [%]		10, 15, 30, 40 [%]	

Las 40 probetas pasan por un proceso de preparación realizada en 3 pasos: pintura, marcado y medición final. En la etapa de pintura, se aplica una capa de pintura blanca elástica sobre la superficie de la probeta, eligiendo cuidadosamente una pintura que sea suficientemente flexible para que no se descascare durante el ensayo. Tras secarse, se procede al marcado, comenzando por medir la longitud total para determinar su centro geométrico, desde donde se marcan los límites de la barra a ensayar según la relación L/D escogida con un marcador permanente. Los puntos de medición (que se siguen con las cámaras de fotografías, sección 4.2) se marcan uniformemente cada 4-5 mm, diferenciando los dispositivos de medición con distintos colores (verde, naranja y morado), los cuales son marcados para diversas proyecciones de las cámaras (-45°, 0° y 45°), de manera de medir la deformación de las barras en 3 proyecciones (y con ello poder determinar su movimiento 3D). Finalmente, se mide la longitud total y se realizan 3 mediciones del diámetro aproximado de la barra con un pie de metro para diversas posiciones.

El rango de los diámetros medidos de las barras (realizadas con el pie de metro) sujetas a diversos porcentajes de corrosión nominal (10, 15, 20, 30 y 40% de pérdida de peso). Por otra parte, si se supone que no existe variación de densidad y que la barra está corroída en forma perfectamente uniforme, y que la barra sin corrosión comienza con un diámetro igual a su valor nominal, se puede establecer la relación descrita en la Ec.(1):

$$\gamma = 1 - \left(\frac{D_{corr}}{D_{nom}}\right)^2 \quad \Leftrightarrow \quad D_{corr} = D_{nom} \cdot \sqrt{1 - \gamma} \quad (1)$$

Donde $\gamma = (m_{corr} - m_0)/m_0$ la fracción de pérdida de peso por corrosión (donde con m_{corr} = masa de probeta corroída y m_0 = masa de la probeta antes de corrosión, D_{corr} = diámetro de la barra corroída, D_{nom} = diámetro nominal de la barra).

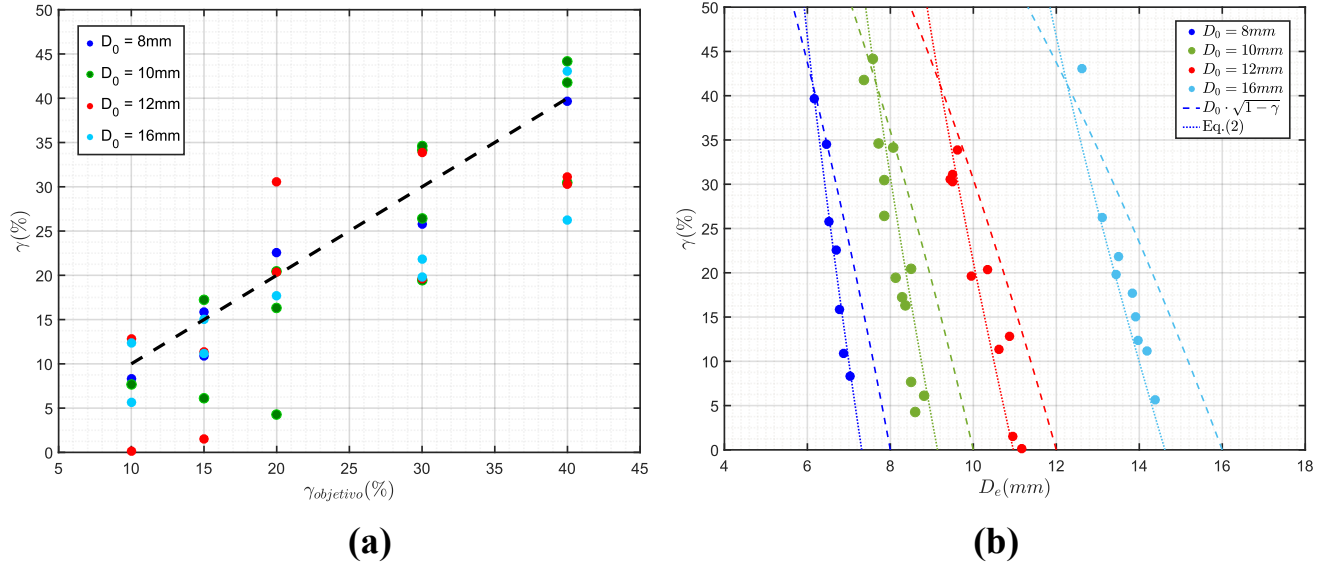


Figura 2 – (a) Relación real de pérdida de masa vs. Relación nominal de pérdida de masa objetivo. (b) Diámetro corroído vs. Relación real de pérdida de masa.

La Figura 2 (a) muestra la corrosión real promedio de pérdida de masa (γ) vs. La corrosión nominal de pérdida de masa objetivo ($\gamma_{objetivo}$) que se obtuvo mediante el proceso de corrosión acelerada según los diferentes diámetros nominales de las barras de refuerzo. Es posible observar que los resultados obtenidos con el proceso de corrosión acelerada muestran una dispersión relativamente grande debido a las incertidumbres asociadas con el proceso de corrosión realizado en el laboratorio. Por otro lado, la relación real promedio de pérdida de masa, permite estudiar un rango más amplio de grados de corrosión. La Figura 2 (b) muestra el diámetro corroído medido (D_{corr}) en función de la corrosión real de pérdida de masa (γ). Las líneas discontinuas muestran la relación clásica $D_{corr} = D_0 \cdot \sqrt{1-\gamma}$ que comúnmente se sugiere al asumir la conservación de la densidad con el diámetro inicial, el cual se asume igual al diámetro nominal de la barra D_0 . Se puede observar que el diámetro corroído medido es mayor que el obtenido con la ecuación simplificada (lo cual se aprecia especialmente en barras con grados de corrosión grandes). Esto implica que las barras de

refuerzo están en cierto grado experimentando un fenómeno de hinchazón durante el proceso de corrosión. Las líneas punteadas están relacionadas con la Ec. (2), la cual se obtuvo relacionando el nivel de corrosión con el diámetro nominal (D_0):

$$D_{corr} = D_0 \cdot \sqrt{3.082 \cdot 10^{-5} \gamma^2 - 0.0073 \gamma + 0.835} \quad (2)$$

4 PROTOCOLO DE DEFORMACIONES

Cada barra fue sometida a un protocolo de deformación cíclicas asimétrica de baja tasa de deformación, para lo cual se utilizó el protocolo de deformaciones SH1-L (Figura 3) descrito en el trabajo de Birrell et al. [2]. Este protocolo de deformaciones consta de múltiples ciclos de pequeñas y grandes deformaciones de tracción y compresión y tiene una amplitud máxima del 5% de deformación en tracción y del 2.4% en compresión, lo cual refleja las demandas de deformación observadas durante eventos sísmicos en elementos de hormigón armado. El protocolo, se introdujo manualmente en la máquina universal y se programó para mantener las deformaciones en los puntos de máxima y mínima deformación con una pausa de 10 segundos. Esta configuración se implementó con la finalidad de captar de buena manera lo que experimentan las probetas en dichos puntos.

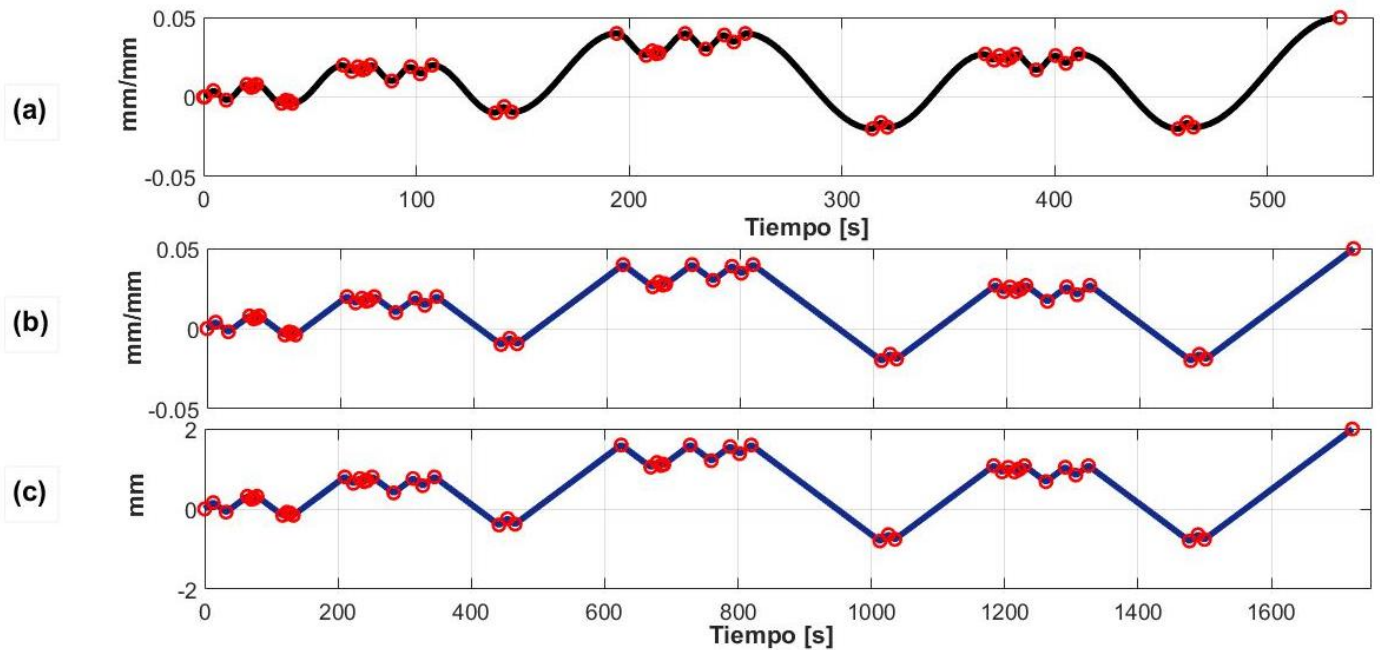


Figura 3 - Protocolo de deformaciones SH1-L [2]. (a) Protocolo de deformaciones SH1-L. (b) y (c) Protocolo de deformaciones aplicado a barra a ensayar

4.1 CONFIGURACIÓN DE ENSAYO

Cuando las barras son esbeltas, lo cual se enfatiza cuando las barras reducen su sección debido a la corrosión, suele ocurrir el efecto del pandeo (que ocurrirá en un plano aleatorio, o de mayor debilidad). Para poder vislumbrar la deformación 3D de las barras, se empleó una configuración de 3 cámaras dispuestas en un ángulo de 45° entre sí, con una vista frontal a la máquina universal (Figura 3). Se utilizaron dos cámaras réflex: Canon EOS Rébel T5i y Canon EOS Rébel T3i, junto con una cámara de video de alta resolución Sony 4K FDR- AXP33 (Figura 4). Para resaltar las probetas, se utilizó un fondo de tela negra y se instalaron luces en ambos costados de la máquina universal para proporcionar una iluminación adecuada y obtener imágenes de alta calidad y contraste, que permitan identificar fácilmente los puntos a medir (se contrastan los puntos de colores con el blanco) mediante el método de fotogrametría. Además, el contraste de las barras con el fondo permite identificar los bordes de las barras (en verde en Figura 5 y Figura 6) y con ello poder trazar su línea media (en rojo en Figura 5 y Figura 6).

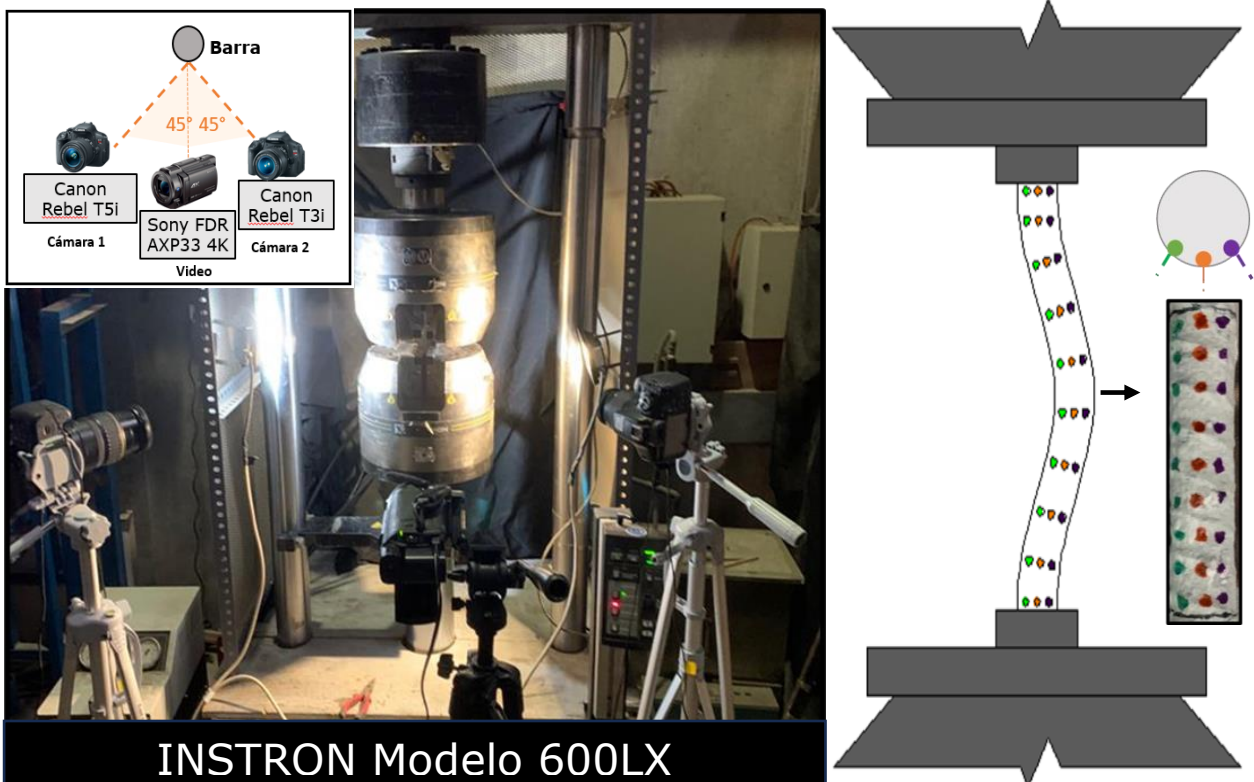


Figura 4 - Vista esquemática de la distribución de cámaras para fotogrametría (izquierda) y barras de acero de refuerzo corroídas ensayadas (derecha).

Para almacenar las imágenes capturadas por las cámaras réflex durante el ensayo, se utiliza el software DSLR Pro Multi Camera con las cámaras conectadas a un computador. Pruebas previas demostraron que las cámaras réflex conectadas al computador tienen una limitación de 1 fotografía cada 5 segundos por cámara, ya que un mayor número de fotografías en un período igual o menor afectaba la calidad debido a que las imágenes se oscurecían debido a la rápida apertura del obturador, impidiendo la correcta implementación de la fotografía y generando ensayos con datos erróneos. Para solventar este problema, se aplicó el protocolo de deformaciones en forma lenta y controlada.

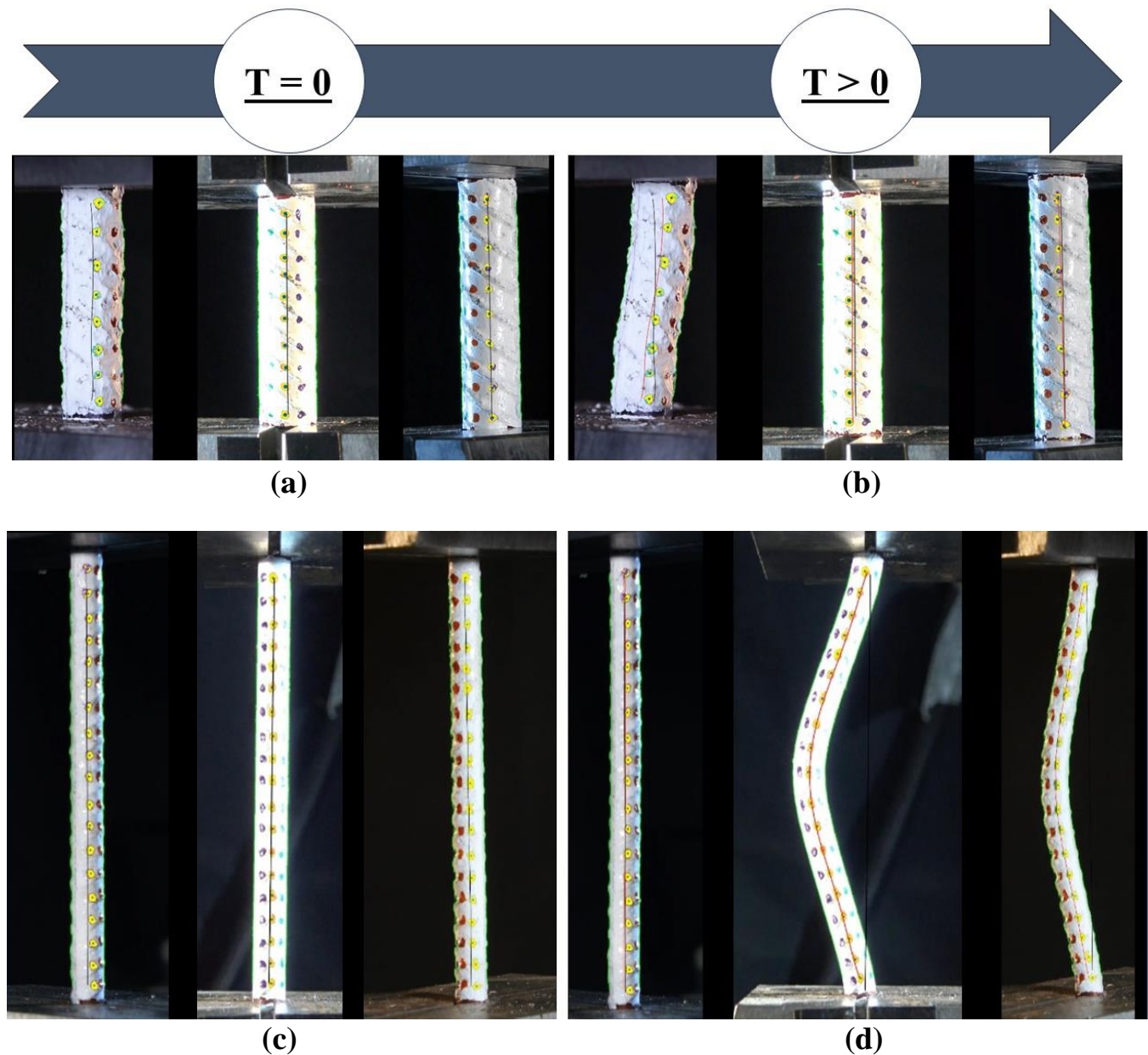
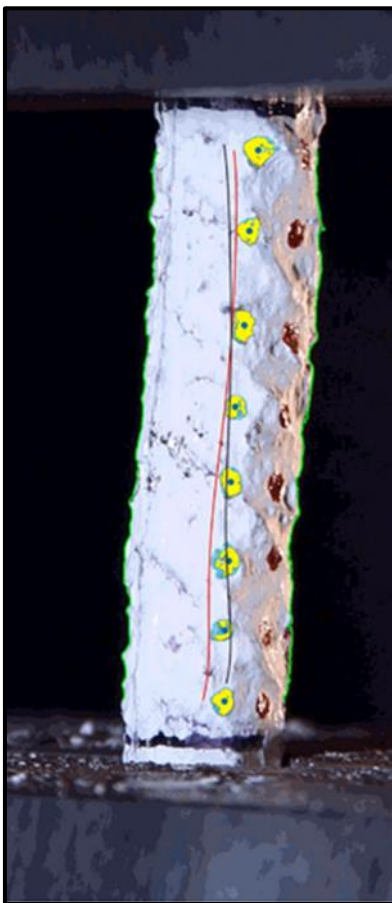


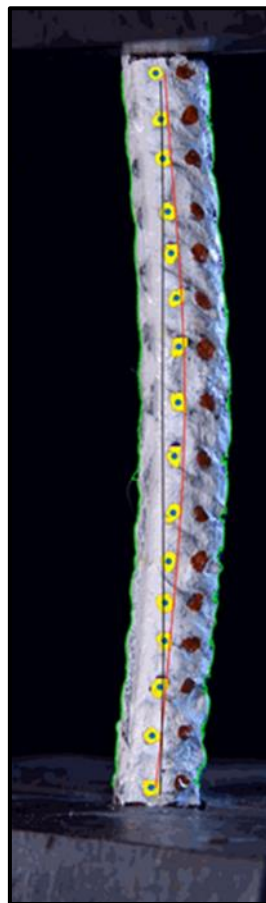
Figura 5 - Imágenes procesadas para tiempo inicial y tiempo $t>0$. Arriba: (a) y (b): Barra con $L/D=4$ y corrosión del 15%.
Abajo: (c) y (d): Barra con $L/D=12$ y corrosión del 15%.

4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Con la probeta en la máquina universal, se verifica que los dispositivos estén capturando adecuadamente las imágenes. También, se verifica la nivelación de cada una de las cámaras a la altura de la barra ensayada y se realizan capturas de imágenes para corroborar que se están obteniendo las imágenes deseadas (Figura 5 y Figura 6).



$\Phi = 10$
 $L/D = 4$
Corr = 15%



$\Phi = 10$
 $L/D = 8$
Corr = 20%



$\Phi = 10$
 $L/D = 12$
Corr = 20%

Figura 6 – Imágenes procesadas con puntos encontrados (azul), zona de búsqueda (amarillo), líneas de contorno (verde), central (negro) y línea media (rojo) para distintas relaciones de L/D para vista de cámara 1.

5 RESULTADOS

5.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y DEFORMACIONES

Para procesar los datos obtenidos en cada ensayo realizado, se utilizan técnicas de fotogrametría programadas en MATLAB [45], que se basan en el uso de detección de puntos de colores según su escala RGB [38]. Es por ello por lo que se utilizaron marcadores de distintos colores para los puntos en cada vista proyectada de la probeta (Figura 4).

La implementación de la rutina comienza con la definición de los puntos de búsqueda en el instante inicial del ensayo, además se define una distancia en píxeles en torno a los puntos búsqueda donde se filtran puntos que posean un color RGB similar al punto de búsqueda. Además, se definen cuadrantes para demarcar los bordes de la probeta en la imagen, lo que permite obtener los contornos de las barras a partir de la diferencia RGB entre el blanco de la probeta y el fondo negro del montaje experimental. Los contornos de las barras entregan información sobre la deformación y permiten establecer una línea central de referencia. Esta línea guía la búsqueda de los puntos en casos de pandeos extremos, así como también dimensiona el alargamiento de la barra. Con los filtros se obtienen los puntos para $t > 0$. En torno a los puntos de búsqueda se marcan en amarillo los puntos que estén en el rango RGB buscado (Figura 6), y luego se define su coordenada como la media geométrica marcada con puntos azules (Figura 6), además los contornos de las barras son marcadas con color verde. También, se define una línea central inicial (en negro) y otra del contorno medio (en rojo). El contraste entre la línea de color rojo y negra permite ver y visualizar los movimientos de la barra a lo largo del ensayo como también, como observar la existencia de movimientos transversales los cuales se observan especialmente en probetas de un L/D bajo.

Para obtener las deformaciones verticales, se emplean los puntos $p_{yi}(t)$ identificados mediante los filtros RGB. Considerando que se tienen " n " puntos a lo largo de la barra, se determina la distancia en píxeles entre cada par de puntos adyacentes (i) e ($i+1$), donde i varía desde 1 a " n ". Finalmente, este desplazamiento se relaciona con la longitud del segmento para obtener la deformación vertical correspondiente (Figura 7 y Figura 8). Las diferencias en los desplazamientos verticales entre puntos, permite observar que las deformaciones unitarias axiales, las cuales se observan no uniformes a lo largo de la barra (y distinta en diversos planos), lo cual se enfatiza cuando se genera pandeo (Figura 7 y Figura 8). Estos resultados muestran un resultado según la ubicación dentro de la barra y que el uso de strain gauges o extensómetros que miden entre dos puntos intermedios podría ser

incorrecto para barras que experimentan pandeo (si se miden puntos intermedios arbitrarios). Se observa que la determinación de la deformación unitaria entre el punto superior e inferior ofrece una estimación promedio. En este contexto, los resultados de calibraciones presentadas en las siguientes secciones considerarán este valor promedio como representativo del comportamiento promedio. Este resultado deja en evidencia que en caso de que se emplee un extensómetro para medir la deformación de una barra, este debiera medir entre los puntos más extremos de la barra. De igual forma, si se quiere realizar un análisis de fotogrametría simple, podría optarse por detectar y seguir puntos que estén cerca de los extremos de la barra.

Posteriormente, se deben sincronizar los datos de deformaciones obtenidas mediante fotogrametría con los resultados medidos por la máquina universal (deformación y carga). Para esto, se utiliza un factor de tiempo de forma manual y se definen rangos donde se encuentran los máximos y mínimos locales. Con estos puntos definidos, se realiza la sincronización entre el tiempo de fotogrametría y de la máquina universal (ver Anexo 0).

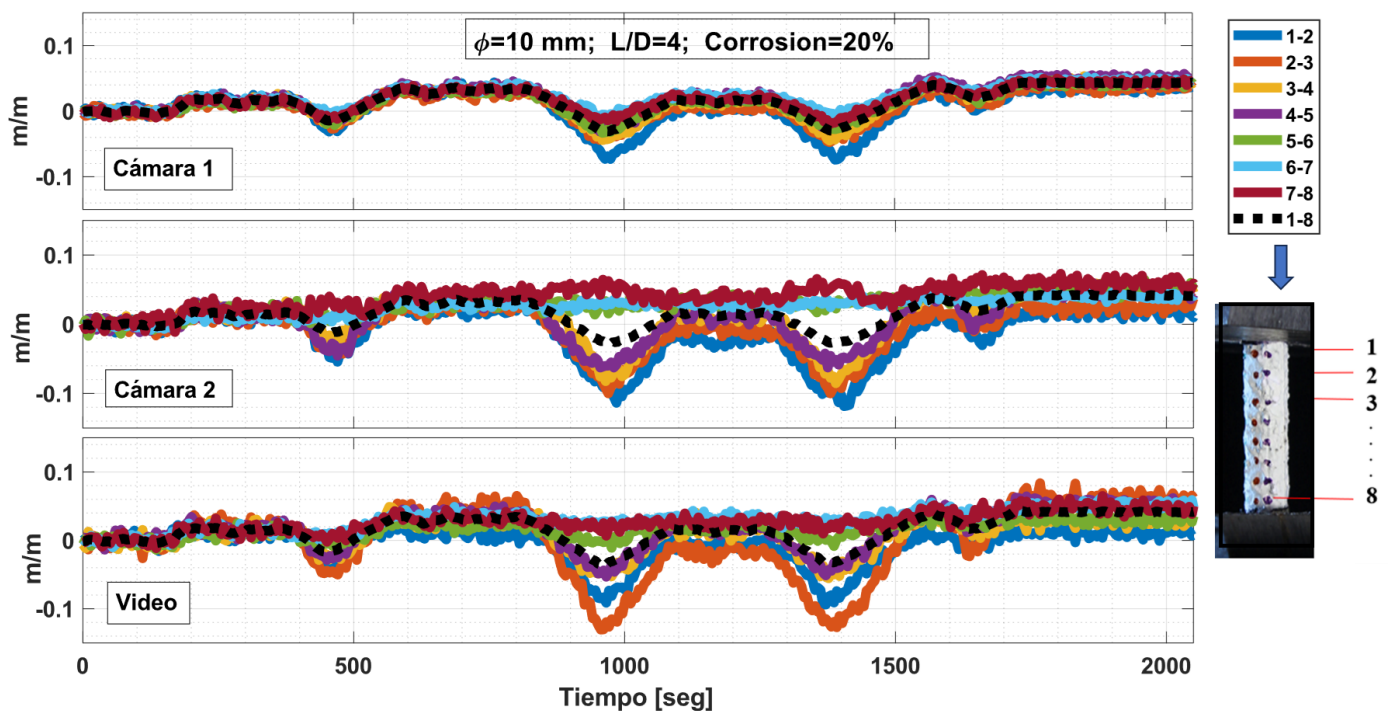


Figura 7 – Deformaciones verticales entre puntos adyacentes a lo largo de barra de acero de refuerzo corroída. Barra con 8 puntos identificados desde arriba hacia abajo (1 arriba y 8 abajo) con identificación de puntos en barra ensayada.

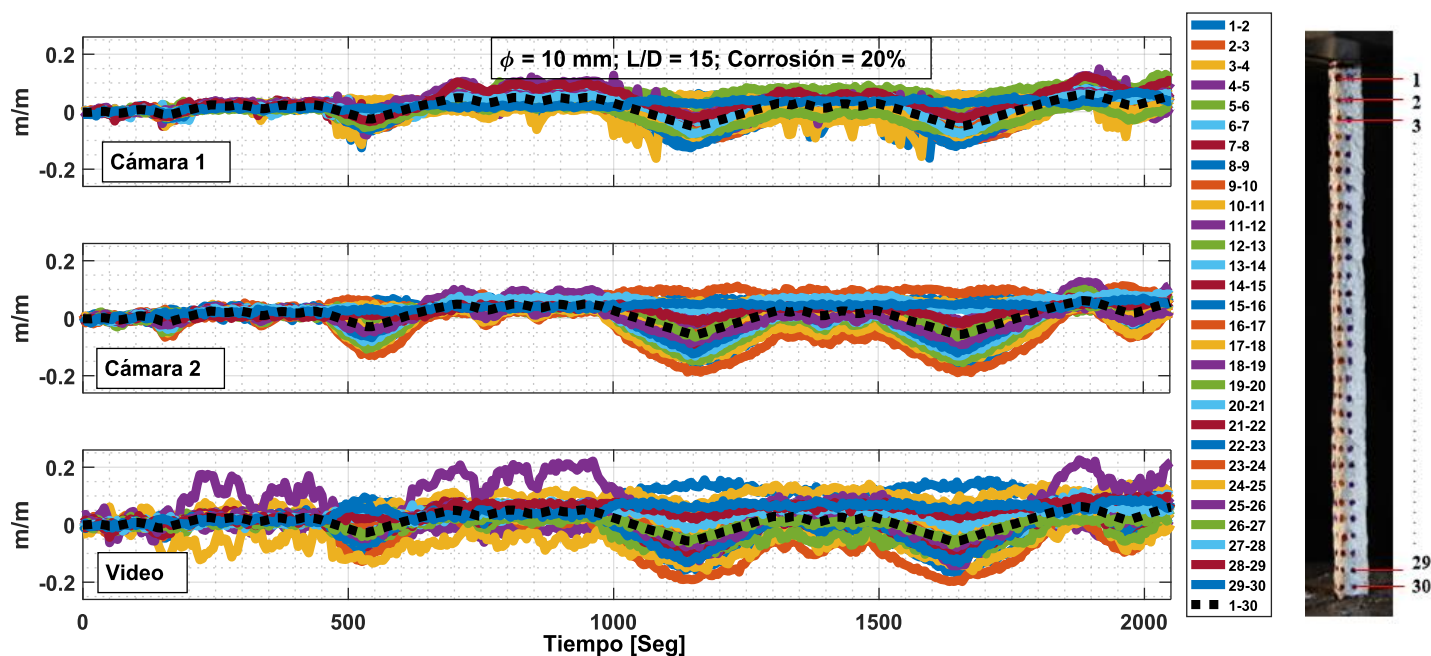


Figura 8 – Deformaciones verticales entre puntos adyacentes a lo largo de la barra de acero de refuerzo corroída. Barra con 30 puntos identificados desde arriba hacia abajo (1 arriba y 30 abajo) con identificación de puntos en barra ensayada.

5.2 CALIBRACIÓN MODELOS OPENSEES

Se realiza un modelo en OpenSees para cada barra de acero de refuerzo ensayada, donde se aplican las deformaciones axiales determinadas a partir de fotogrametría (entre el punto superior e inferior, equivalentes al promedio entre puntos locales). Se decide excluir los desplazamientos transversales inducidos por la maquina universal para barras de baja esbeltez (L/D bajo ~ 4). Se decide emplear el modelo constitutivo de GMP, denominado Steel02 en OpenSees (Figura 9), para modelar al acero, cuyos parámetros son calibrados para cada ensayo (este modelo no incluye efectos de pandeo). El modelo discretiza la barra en segmentos de 2 mm de longitud (con 5 puntos de integración Gauss-Lobato) y se utilizan elementos del tipo *forceBeamColumn* considerando una sección circular de múltiples fibra (20 fibras en la dirección radial y 50 fibras en la dirección circunferencial), similar a lo realizado por Kashani [3][38]. Como es de esperar, además de los parámetros asociados al modelo constitutivo Steel02, se incluye el diámetro de la barra como parámetro de ajuste (parámetro esencial para el caso de corrosión). Para incluir los efectos de grandes de deformaciones y con ello el pandeo se emplea una transformación corrotacional para los elementos tipo barra [46][47]. Asimismo, se definió una imperfección inicial de $L/1000$ considerando la primera forma de pandeo elástico de una barra empotrada-empotrada.

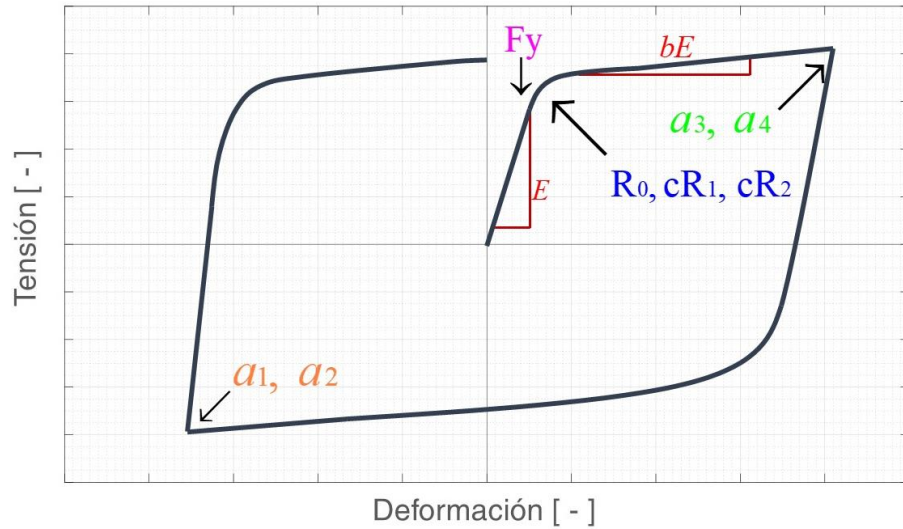


Figura 9 - Modelo constitutivo Giuffrè Menegotto Pinto (GMP) [2]

Para calibrar los parámetros que definen al modelo constitutivo Steel 02 y el diámetro de la barra, se realiza un problema de optimización, donde se busca minimizar el error entre los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos y los experimentales (i.e., la fuerza longitudinal). Con esta finalidad, se implementa una rutina en MATLAB utilizando la función ‘fmincon’ con la finalidad de minimizar el error medio cuadrático normalizado o ‘NRMSE’ (Normalized Root Mean Squared Error), que permite evaluar el ajuste entre los datos experimentales y los resultados del modelo de elementos finitos. El material Steel02 en OpenSees[4] se define por los siguientes parámetros: F_y , E , b , R_0 , cR_1 , cR_2 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 . En particular, los valores de a_2 y a_4 se fijaron, de manera que el efecto de estos se vea mayormente representado por la variación de los parámetros a_1 y a_3 . Considerando lo anterior, los parámetros a calibrar del modelo de elementos finitos son los siguientes: F_y , E , b , R_0 , cR_1 , cR_2 , a_1 , a_3 y el diámetro efectivo de la barra (que se supone uniforme a lo alto de la barra). Los parámetros iniciales del modelo Steel 02 se toman iguales a los promedios utilizados en [2], y el supuesto inicial del diámetro efectivo conforme a lo medido con el pie de metro. La Figura 10 muestra el ajuste obtenido para diversos casos representativos referidos a un nivel de corrosión medio.

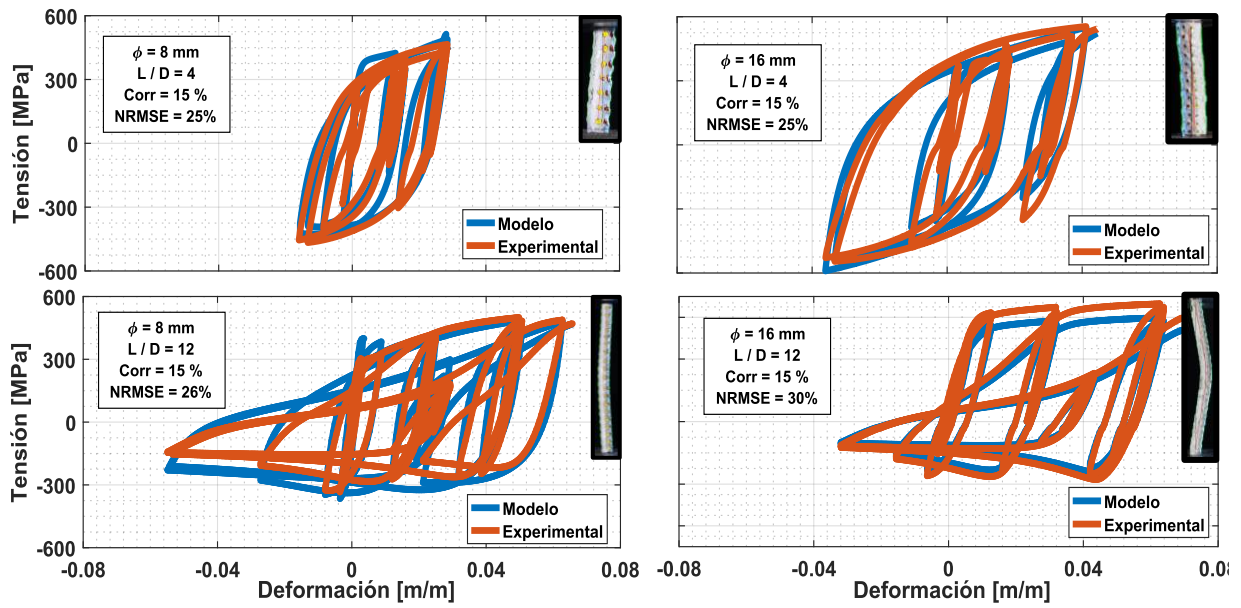


Figura 10 – Curvas de Tensión vs. Deformación Experimentales vs. Calibradas en OpenSees.

La Figura 11 y Figura 12 resume los parámetros ajustados para diversos niveles de corrosión, valores de L/D, y barras de distinto diámetro (Azul – 8 mm; Verde – 10 mm; Rojo – 12 mm; Celeste – 16 mm). En términos generales el ajuste obtenido fue bastante exacto mostrando valores NRMSE entre 20 y 30%.

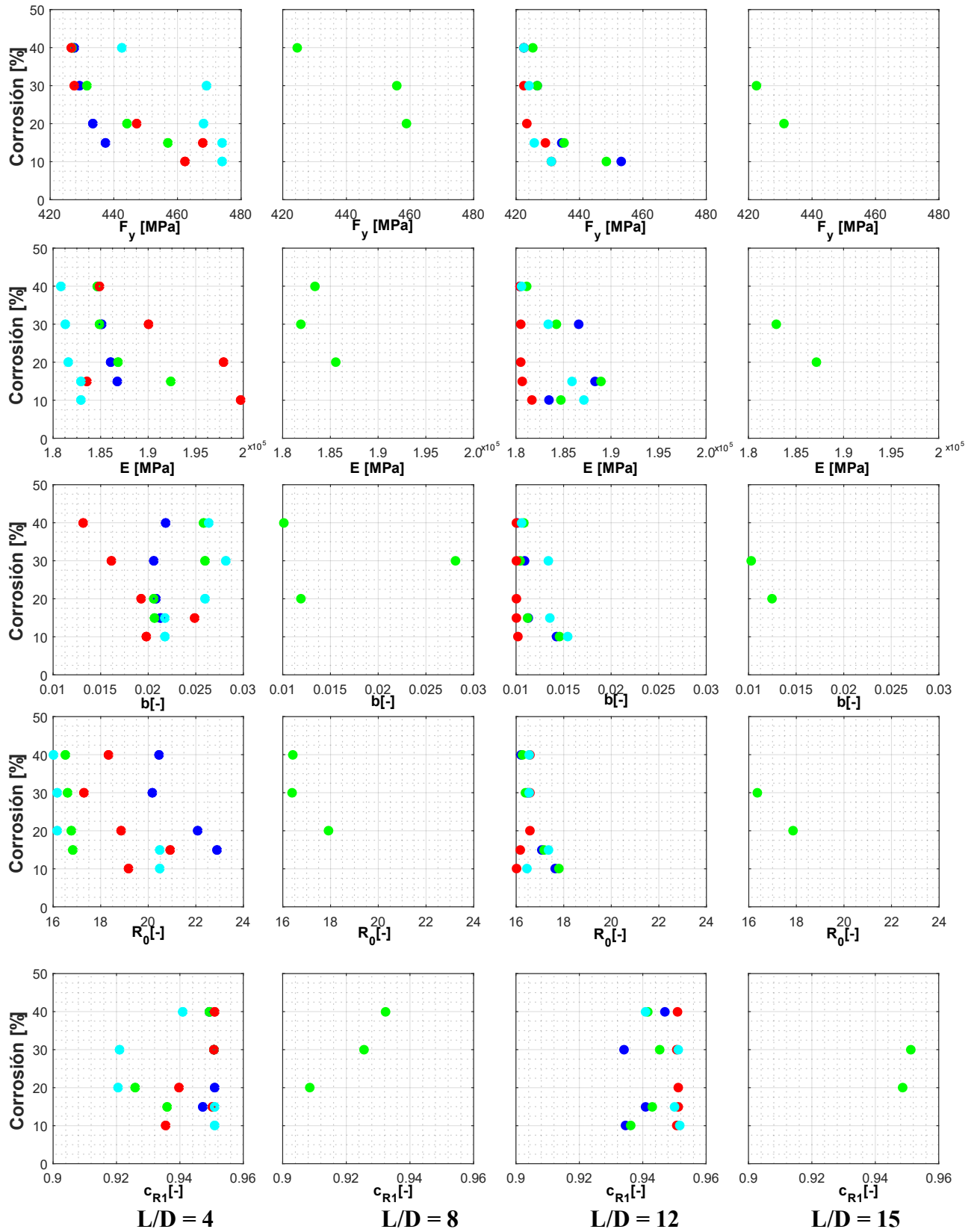
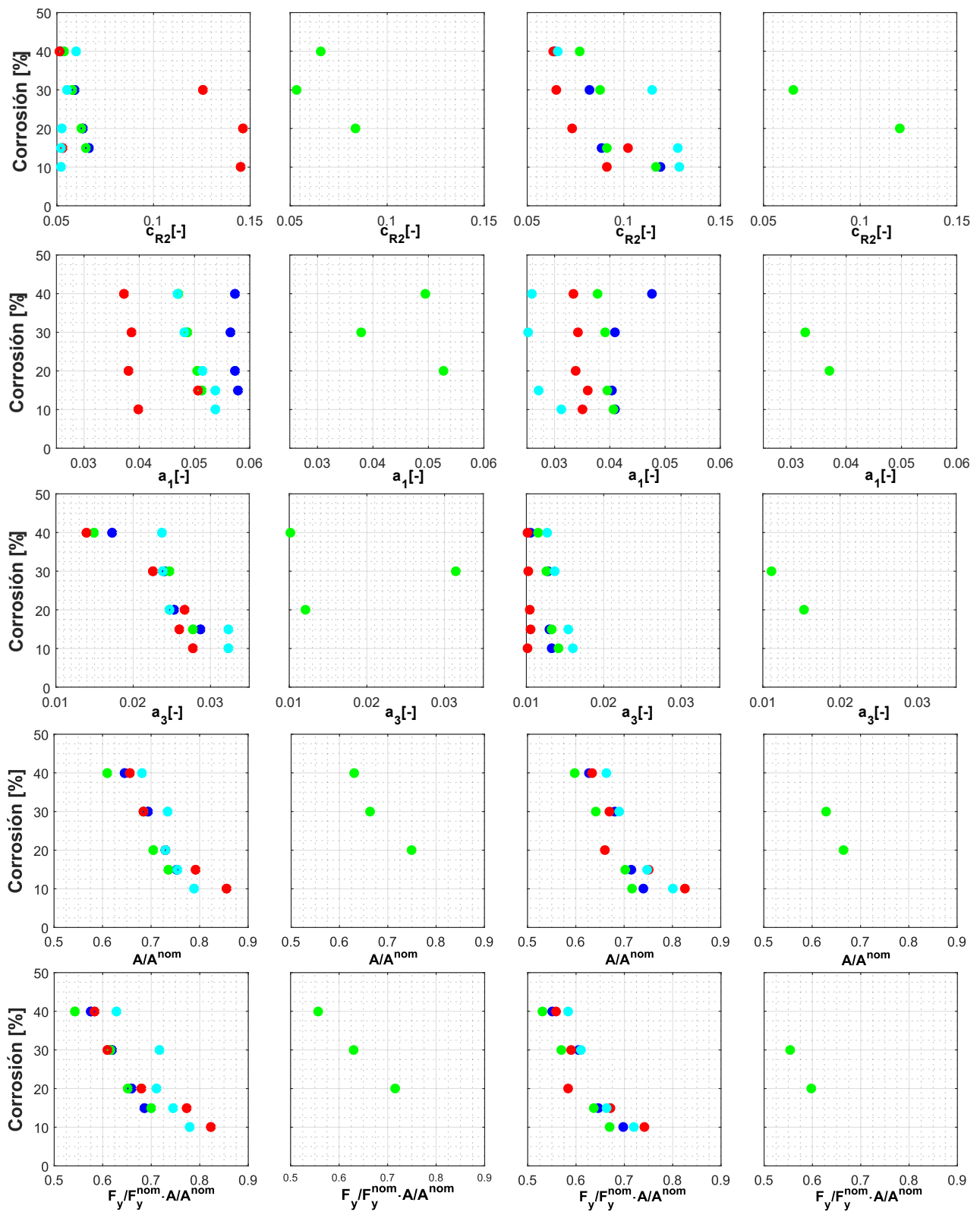


Figura 11 – Ajuste de parámetros de modelo Steel 02 y diámetro de barra de refuerzo. Los colores representan los diámetros nominales: Azul – 8 mm; Verde – 10 mm; Rojo – 12 mm; Celeste – 16 mm.



L/D = 4

L/D = 8

L/D = 12

L/D = 15

Figura 12 – Ajuste de parámetros de modelo Steel 02 y diámetro de barra de refuerzo. Los colores representan los diámetros nominales: Azul – 8 mm; Verde – 10 mm; Rojo – 12 mm; Celeste – 16 mm.

Se realiza un análisis de sensibilidad para un set de calibraciones representativas mostradas en la Figura 12. Es decir, la Figura 13 muestra cómo cambia el error NRMSE del ajuste entre los datos modelados y experimentales al mantener fijo los parámetros óptimos (ajustados) y variar cada uno de los parámetros en forma individual en torno al rango de variación observado en la Figura 11 y Figura 12.

A partir de los resultados obtenidos desde las calibraciones, es posible observar que existe una tendencia a una leve disminución de la tensión de fluencia a medida que aumenta el nivel de corrosión, esto se atribuye principalmente a que existe pérdida del material, lo que reduciría la sección transversal efectiva, provocando que la capacidad de carga axial de las barras disminuya. También, se observa una leve disminución del módulo de elasticidad a medida que aumenta el porcentaje de corrosión. Esta reducción del módulo de elasticidad (E), indica un comportamiento levemente más susceptible al pandeo. Esta tendencia puede explicarse por la presencia de irregularidades y anisotropía inducida por la corrosión, lo que afecta negativamente la magnitud del módulo de elasticidad equivalente. Es posible observar que la desviación de los parámetros calibrados es menor para L/D mayores y para un mayor porcentaje de corrosión, esto puede deberse a la no inclusión de los desplazamientos transversales y errores de medición que se acentúan en barras con valores bajos de L/D .

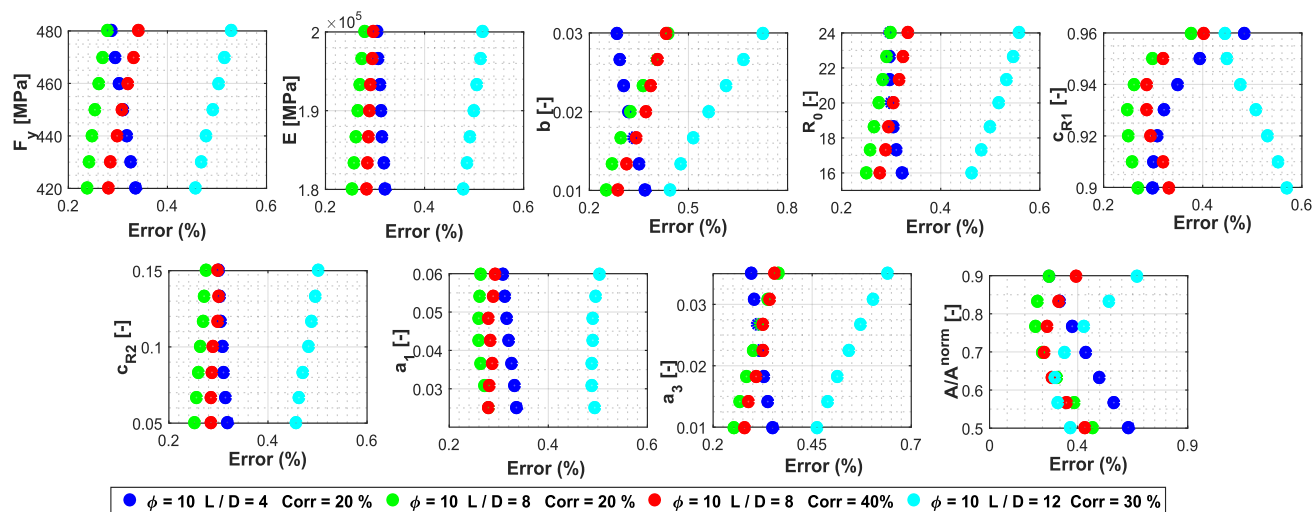
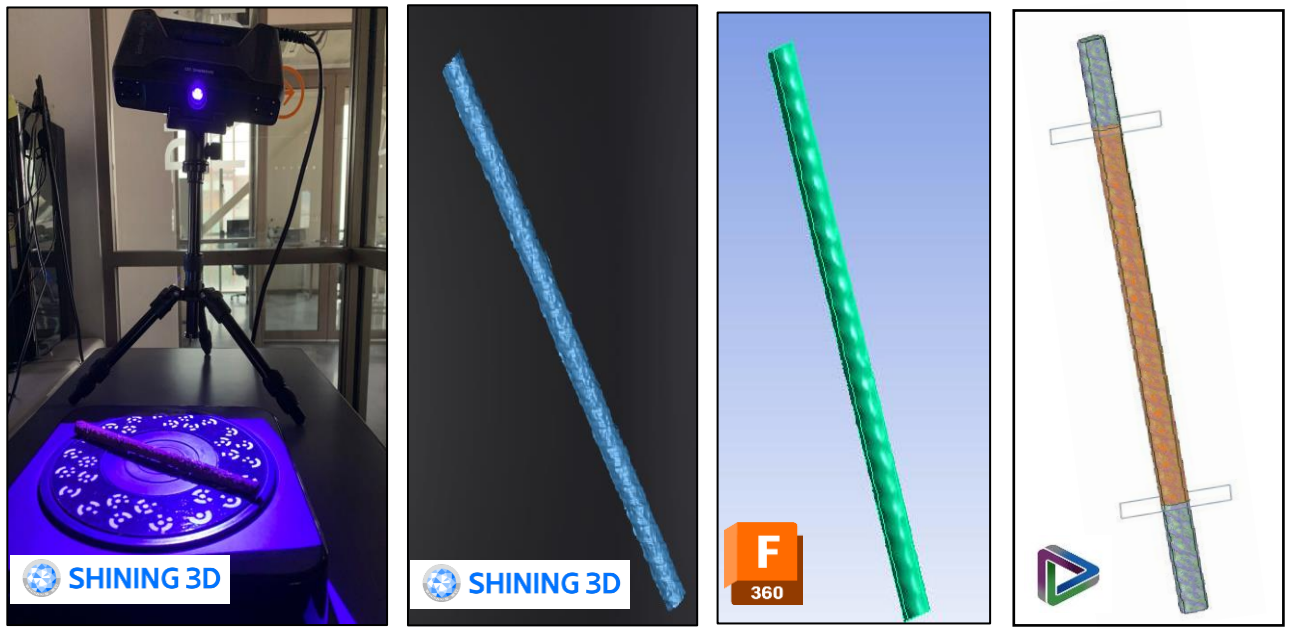


Figura 13 – Análisis de sensibilidad en barras de acero corroídas con diámetro de 10 mm relaciones L/D de 4 a 12 y corrosiones de 10, 20 y 40 [%].

A pesar de las tendencias señaladas, se puede concluir, en términos generales, que no existe una variación notoria de los parámetros asociados al modelo constitutivo que fue empleado para la calibración (steel02). A partir de la Figura 11y Figura 12 se puede observar que para un acero A630-420H se puede considerar sin incluir mucho error un $F_y=440\text{MPa}$; $E=190000\text{MPa}$; $b=0,01$; $R_0=16$; $c_{R1}=0,94$; $c_{R2}=0,075$; $a_1=0,04$; $a_3=0,01$ independiente del diámetro, esbeltez y nivel de corrosión (afectando levemente los resultados de ajuste).

5.3 MODELOS 3D EN ANSYS APDL- Workbench

Antes de realizar los ensayos experimentales, se efectuaron escaneos 3D a un grupo representativo de barras. Este proceso fue realizado en el Laboratorio Experimental de Estructuras de la Universidad de los Andes, utilizando un Escáner 3D Einscan Pro 2X Plus, lo cual permitió obtener la geometría superficial a través del software EXScan Pro. A continuación, la geometría se exporta al programa Fusión 360 [48], donde se realiza una reparación de la superficie. Luego, se ejecuta el suavizado superficial de la barra utilizando ANSYS SpaceClaim, donde se utiliza la herramienta *Shrink wrap* (gap size = 1 mm) que permite crear una nueva superficie ajustada al modelo 3D. Posteriormente con la función *Autoskin* se suaviza la superficie obtenida. Además, se utilizan los cortes de plano para abarcar en el modelo la parte de la barra que se encuentra soportada por las mordazas de la máquina universal. Finalmente, se importa la geometría a ANSYS APDL en su plataforma Workbench donde se procede a generar un modelo de elementos finitos de elementos sólidos del tipo *Hex Dominant* de 1 mm aproximado (Figura 14). En consecuencia, al modelo se le aplican los desplazamientos verticales en los extremos de la barra inferidos del análisis de fotogrametría (sección 4).

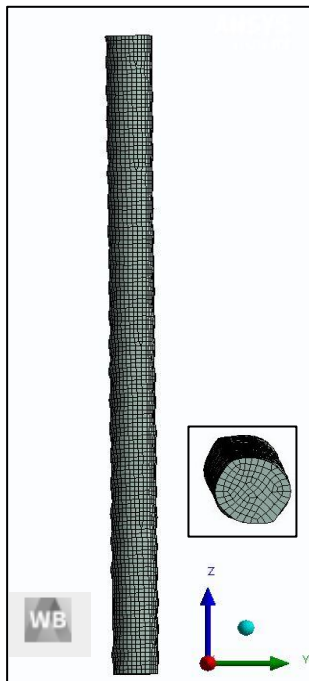


(a)

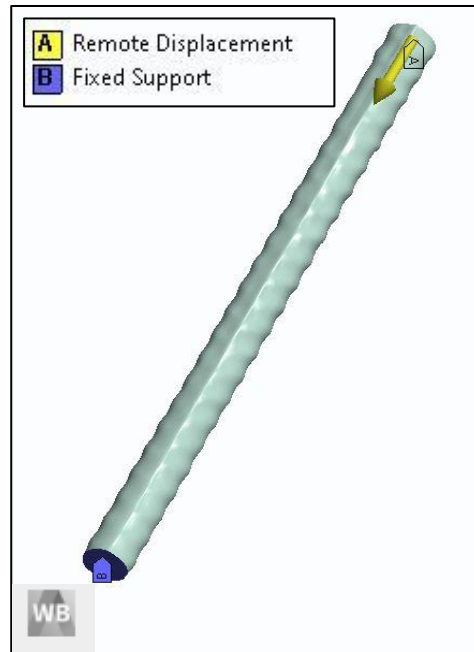
(b)

(c)

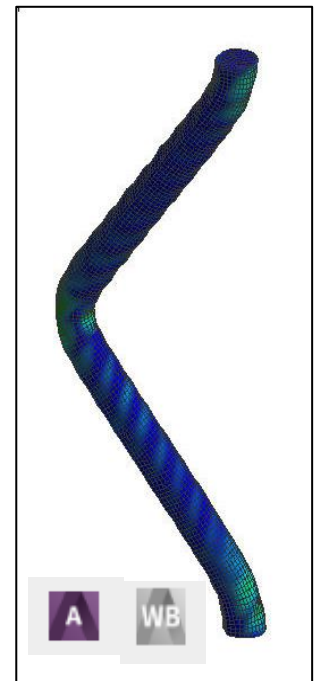
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 14 – (a) Einsic Pro 2X Plus junto a plataforma fija accesoria con barra corroída. (b) Geometría escaneada con EXScan Pro. (c) Reparación y llenado de barra corroída en Fusión 360. (d) Suavización y corte de barra corroída en Spaceclaim. (e) Mallado de barra corroída en ANSYS APDL-Workbench. (f) Condiciones de desplazamiento y empotramiento en ANSYS Workbench. (g) Resultados de modelo con ANSYS APDL-Workbench.

De esta forma, se obtienen los modelos realizados, teniendo como resultados gráficos lo que se observa en la Figura 15 para una barra con $L/D=15$, que experimenta pandeo.

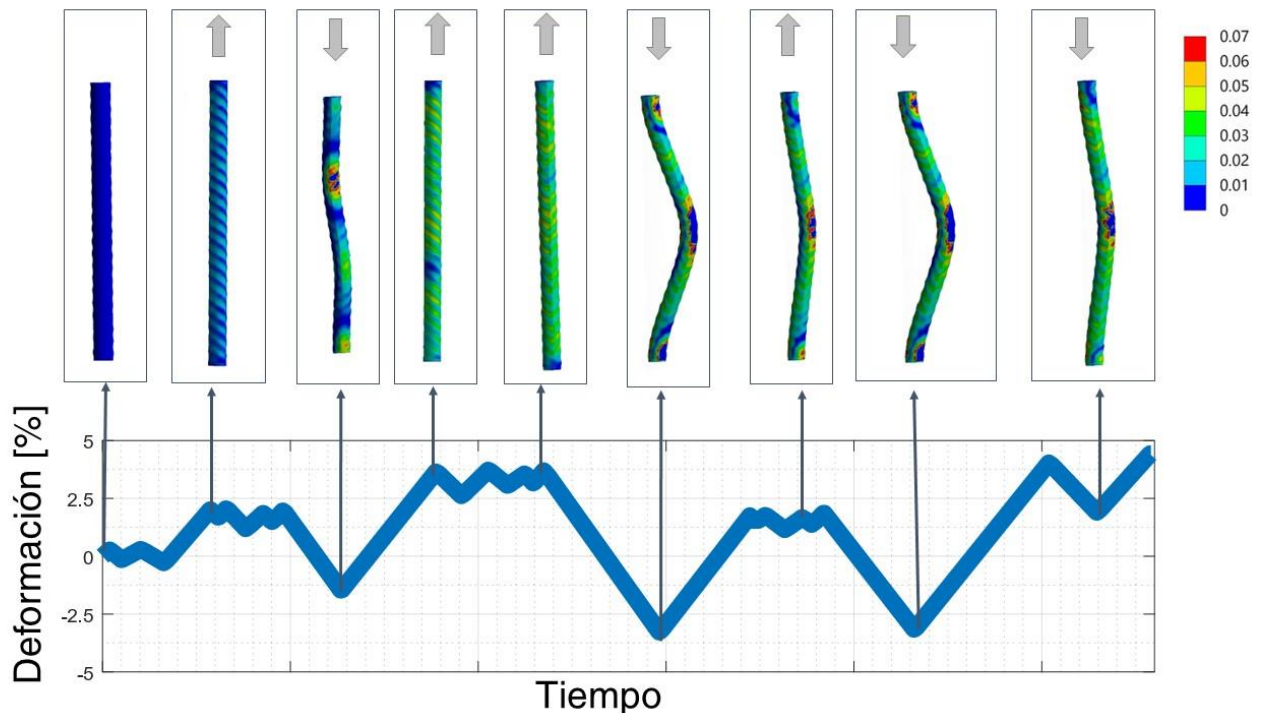


Figura 15 – Línea del tiempo modelo ANSYS y niveles de deformación plástica.

Barra $\Phi = 10$ (mm), $L/D = 15$, Corrosión = 20%.

La Figura 16, Figura 17 y Figura 18 muestran los resultados obtenidos a partir del modelo tridimensional de elementos finitos de las barras ensayadas. La Figura 16 muestra la comparación entre la curva tensión-deformación experimental y modelada por el programa, en las cuales se puede apreciar un excelente ajuste entre los resultados experimentales y los modelados (NRMSE=30-35%). Similarmente la Figura 17 y Figura 18 muestra las deformaciones plásticas en el instante de máxima deformación de compresión, donde se puede comprobar que las deformaciones no son uniformes a lo largo de la barra. La Figura 16 muestra una excelente concordancia entre el modelo y las fotografías de los ensayos, pudiendo vislumbrar las zonas donde se concentran las deformaciones debido al pandeo (observándose una triple rotula cuando las barras esbeltas se pandean). Los casos mostrados corresponden a barras de diversa esbeltez ($L/D=4$ y 15) y de condiciones asociadas a un diámetro promedio de 10 mm y a un nivel intermedio de corrosión igual a un 20%.

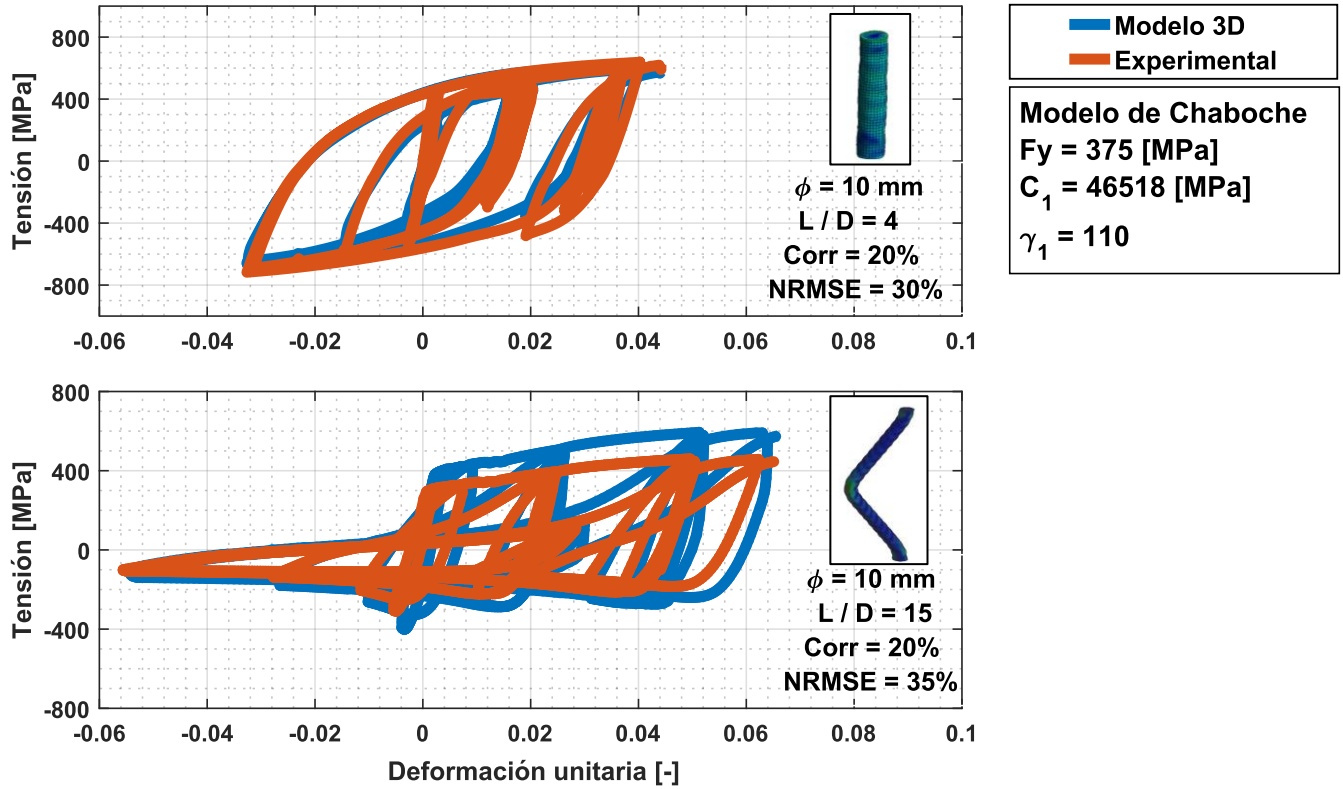


Figura 16 – Curvas Tensión Deformación Modelo 3D vs. Experimental con parámetros del material de Chaboche Kinematic Hardening de ANSYS Workbench.

$\phi = 10$ mm; $L/D=4$; Corrosión=20%

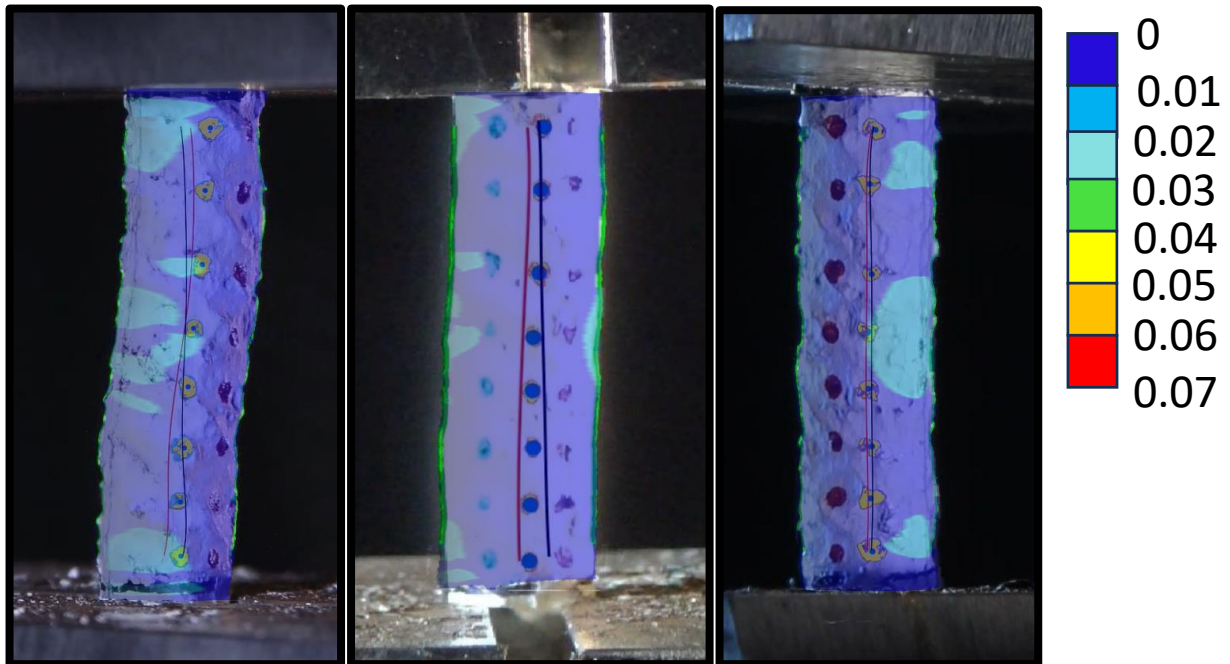


Figura 17 – Comparación de deformaciones ANSYS vs Experimental y deformaciones plásticas.

$\phi = 10 \text{ mm}; L/D=15; \text{Corrosión}=20\%$

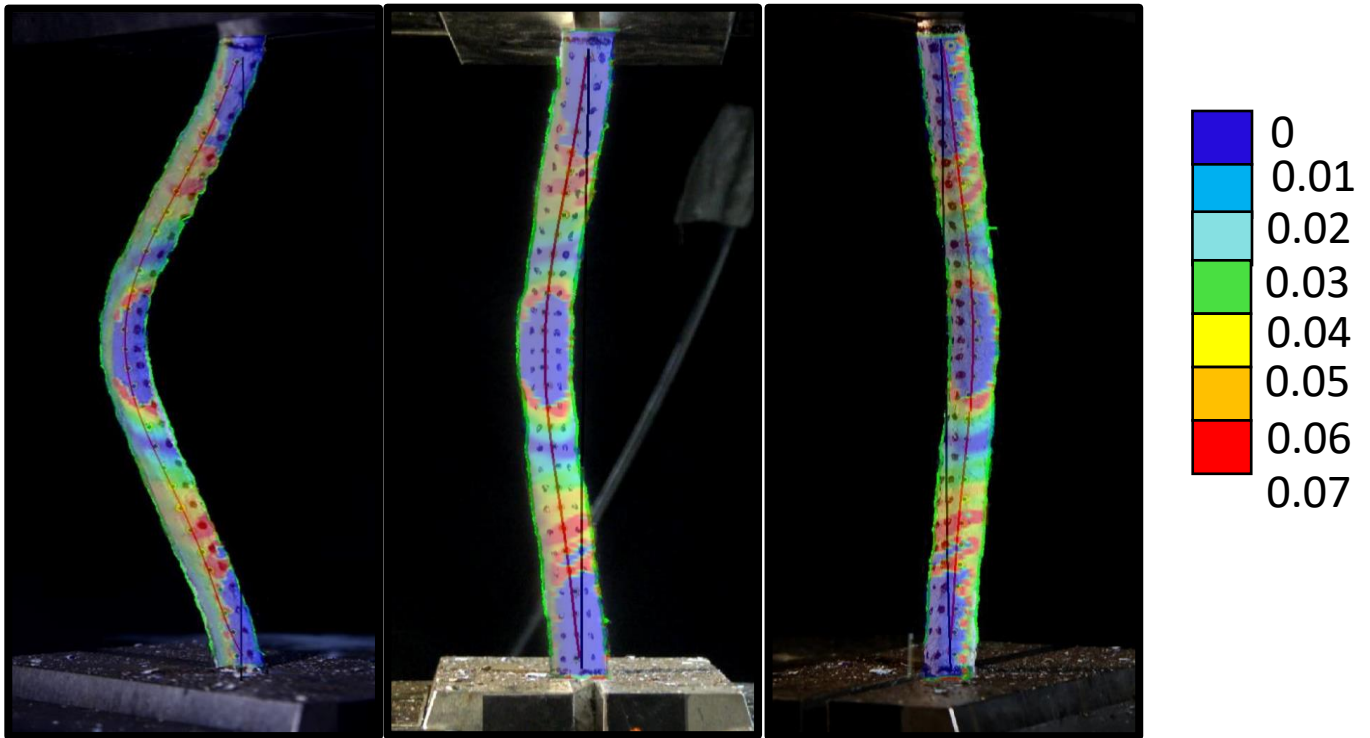


Figura 18 – Comparación de deformaciones ANSYS vs Experimental y deformaciones plásticas.

Para la modelación se consideró un modelo constitutivo de Chaboche[43] con endurecimiento cinemático de tres parámetros (Figura 19). Los parámetros asociados al acero A630-420H del modelo Chaboche (F_y , C_1 , γ_1) fueron ajustados a partir de un set de datos cíclicos tensión-deformación (sin pandeo) relacionados a un ensayo de una barra de baja esbeltez ($L/D=4$) utilizando la herramienta *CurveFitting* de ANSYS Workbench. Por otra parte, el pandeo es directamente incluido en ANSYS APDL para barras con mayores esbelteces (ej. $L/D=15$) al considerar un análisis de grandes deformaciones, como se observa en la Figura 17 y Figura 18, los valores medidos de la longitud de pandeo son congruentes con la longitud de pandeo observada en un elemento empotrado-empotrado que experimenta pandeo formando las rótulas articuladas.

En este caso se consideran los parámetros del modelo Chaboche ajustados para la barra con $L/D=4$ para la barra más esbelta con $L/D=15$. En general se puede observar que la modelación pudo simular correctamente la dirección en cual se pandean las barras, con lo que se puede concluir que la dirección en cual se pandean se relaciona fuertemente con la geometría superficial.

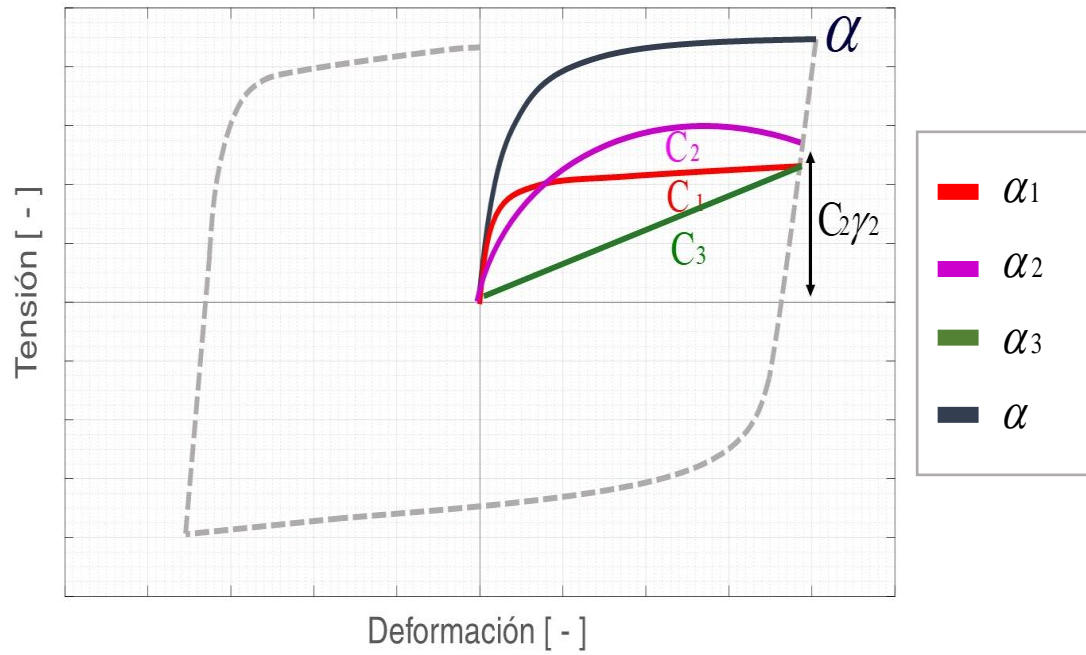


Figura 19 – Modelo constitutivo de Chaboche y parámetros de Chaboche[43].

$\phi = 10 \text{ mm}; L/D=15; \text{Corrosión}=20\%$

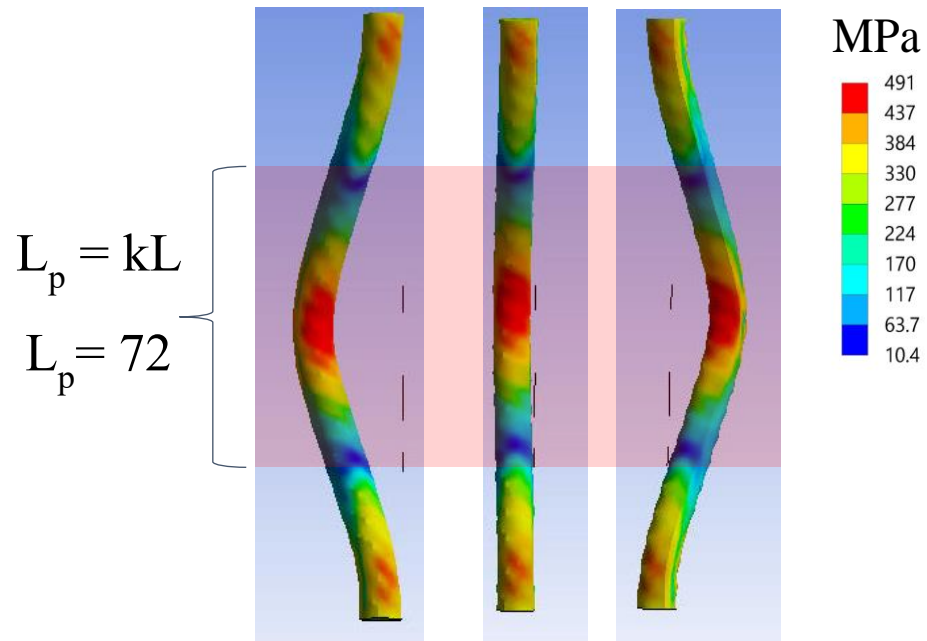


Figura 20 – Tensión de Von Mises ANSYS Workbench y longitud de pandeo del modelo KL con $K=0.5$

6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una leve disminución de la tensión de fluencia y del módulo de elasticidad con el aumento del porcentaje de corrosión, así como una influencia significativa de la relación L/D en el comportamiento de la respuesta cíclica de una barra de refuerzo esbelta ($L/D > 8$) y que en consecuencia su respuesta cíclica es altamente controlada por el pandeo. Los parámetros F_y , b , R_0 , cR_1 , cR_2 , a_1 y a_3 ajustados del modelo constitutivo GMP muestran poca variabilidad lo que sugiere que son propios del material empleado (Acero A630-420H). Como era de esperarse el parámetro que genera mayor influencia en la respuesta de las barras de refuerzo (con y sin corrosión) es su diámetro efectivo. Dado que la corrosión reduce el diámetro efectivo al aumentar el nivel de corrosión, es evidente que esta afecta directamente a la relación de aspecto L/D , y por tanto se puede concluir que la corrosión no solo afecta a la resistencia de fluencia de la barra (debido a la reducción de la sección transversal), sino que también afecta a su resistencia a pandeo. En términos generales se observó que para el caso de corrosión uniforme el uso de un único parámetro referido al diámetro efectivo (que se supone invariante a lo largo de la barra y que se ajusta para cada ensayo) es suficiente para modelar la respuesta inelástica de la barra tanto en tracción como en compresión, para diversos diámetros y diversas relaciones de aspecto (L/D , i.e., con y sin pandeo).

En general el pandeo de las barras se inicia debido a un pandeo del inelástico, que involucra que el momento de flexión se hace nulo a $1/4$ y $3/4$ de la altura de la barra doblemente empotrada. Esto genera tres zonas de alta curvatura, el extremo superior, el extremo inferior y el centro de la barra y este genera deformaciones plásticas en tres rotulas plásticas para el caso de barras empotradas-empotradas se ubican en el extremo superior, inferior y en el centro de la barra. Entre los puntos de las rotulas plásticas (en cual se observa un momento plástico) existe un punto intermedio en cual el momento se hace nulo, lo cual genera un largo de pandeo efectivo similar al que se obtiene de la teoría de Euler ($L_e = 0.5L$) (Figura 20) que se obtiene entre los puntos en cual los momentos de la barra se hacen nulos (largo equivalente de una viga simplemente apoyada). El pandeo genera plastificación de la barra en las zonas de rotulas plásticas (en especial en la zona central de la barra), lo que hace que su respuesta cíclica dependa de las deformaciones generadas en sus ciclos anteriores. En este contexto, se comprobó que la ley de endurecimiento de GMP y Chaboche son apropiados para modelar la respuesta cíclica del material.

Por otra parte, el efecto del pandeo puede ser correctamente modelado considerando grandes deformaciones o el equilibrio en la posición deformada. En concreto la utilización de modelos en OpenSees de múltiples barras uniaxiales con plasticidad distribuida (`forcebeamcolumn`) y una transformada corotacional fue suficiente para ajustar los parámetros de un modelo constitutivo del acero del tipo GMP (`Steel02`) que se ajusta con alta exactitud a los datos experimentales de barras de refuerzo (con y sin pandeo) sujetas a ensayos cíclicos no convencionales (que siguen un patrón de deformaciones inferidas de un caso sísmico). Observándose que los parámetros del modelo GMP permiten modelar el comportamiento cíclico del material y de barras que no se pandean (i.e., modeladas con un único elemento o sin considerar múltiples secciones de integración a su largo).

En cuanto a los análisis de sensibilidad se ha demostrado que ciertos parámetros tienen una influencia más significativa en la precisión del ajuste del modelo. La reducción del límite de fluencia y el módulo de elasticidad, así como la optimización de los parámetros b , R_0 y a_3 , pueden mejorar el ajuste entre el modelo realizado y los resultados experimentales. Además, se identifica la importancia crítica del área de la sección transversal en el ajuste del modelo y su relación no lineal con respecto al grado de corrosión, subrayando la necesidad de mediciones precisas en este aspecto.

Se observa que tanto el diámetro geométrico que fue medido con un pie de metro (luego de la limpieza de la herrumbre de las barras) y el obtenido del escaneado 3D de las barras (a partir de diversas secciones transversales o del volumen) tienen un alto grado de similitud dado que las barras ensayadas evidencian una corrosión relativamente uniforme, y ambas mediciones se relacionan a partir de la geometría superficial de la barra después de haber sido corroída. Sin embargo, el diámetro medido de la barra (con pie de metro o a partir de las mediciones del escáner) no se condice con el diámetro efectivo que se ajusta de manera que los resultados de los modelos de elementos finitos realizados en OpenSees concuerden con los datos experimentales.

Sin mediar lo anterior, el diámetro efectivo muestra una tendencia similar que la obtenida a partir de una relación teórica inferida a partir de la pérdida de peso o del porcentaje de corrosión. En otras palabras, el diámetro efectivo es similar al diámetro que se determina en función de la fracción de corrosión (determinado de la pérdida de peso). Esto sugiere que aparentemente, las barras experimentan un cambio de densidad o se expanden cuando se corroen, generando diferencias entre el diámetro que se mide una vez corroída y el diámetro que se determina empleando la pérdida de peso (es decir, se considera la fracción de pérdida de volumen igual a la fracción de

pérdida de peso suponiendo que se mantiene la densidad) pero con un diámetro efectivo que es correspondido con el peso la barra. En otras palabras, el diámetro observado de la barra, obtenido mediante las mediciones con pie de metro o a partir del scanner 3D, es significativamente mayor que el diámetro efectivo.

Por otra parte, en cuanto a los ajustes de modelo de elementos finitos 3D utilizando la ley constitutiva de Chaboche para modelar al acero, se obtiene una representación razonable del comportamiento mecánico de las barras de acero de refuerzo bajo las condiciones impuestas a las probetas. Si bien existen variaciones y desviaciones en los resultados, en general, los modelos son capaces de proporcionar una estimación adecuada de lo que experimentan las probetas en los ensayos. Además, los modelos permitieron observar la distribución no uniforme de las deformaciones plásticas experimentadas por las barras ensayadas, complementándose con lo experimentado en laboratorio por las barras y visto también a partir de los resultados obtenidos por fotogrametría sobre las deformaciones verticales distintas a lo largo de las barras según la ubicación de estudio dentro de la barra. Sin embargo, es fundamental recordar que ningún modelo puede capturar las complejidades del comportamiento real, y los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones y suposiciones del modelo realizado.

Otra arista del modelo 3D realizado es que se presenta un patrón de pandeo similar a lo que se observa experimentalmente, esto indica que las imperfecciones superficiales tienen incidencia en la dirección en la cual la barra se patea. Además, a través de estos modelos se pudo notar que es posible ajustar en forma razonable la respuesta de diversas barras, es decir, con diversos niveles de corrosión, diámetros o relación de aspecto L/D empleando el mismo modelo de material (en este caso, las barras corresponden al material A630-420H) e incluyendo la geometría medida por el scanner 3D.

Los modelos también proporcionaron una valiosa percepción de la distribución no uniforme de las deformaciones plásticas experimentadas por las barras sometidas a ensayo. Estos resultados se complementan con las observaciones realizadas en el laboratorio y corroboradas mediante los resultados obtenidos por fotogrametría. La variabilidad en las deformaciones verticales a lo largo de las barras, que dependen del punto de análisis, se observa y se puede contrastar con los resultados de los modelos 3D. Esto también permite vislumbrar la importancia de implementar métodos como la fotogrametría, así como también de geometrías 3D mediante el escaneo de la geometría real, siendo un aporte significativo en la investigación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zhang P, Restrepo JI, Conte JP, Ou J. Nonlinear finite element modeling and response analysis of the collapsed Alto Rio building in the 2010 Chile Maule earthquake. *Struct Des Tall Spec Build* 2017;26. <https://doi.org/10.1002/tal.1364>.
- [2] Birrell M, Astroza R, Carreño R, Restrepo JI, Araya-Letelier G. Bayesian parameter and joint probability distribution estimation for a hysteretic constitutive model of reinforcing steel. *Struct Saf* 2021;90. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102062>.
- [3] Kashani MM, Lowes LN, Crewe AJ, Alexander NA. Phenomenological hysteretic model for corroded reinforcing bars including inelastic buckling and low-cycle fatigue degradation. *Comput Struct* 2015;156:58–71. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.04.005>.
- [4] McKenna F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Comput Sci Eng* 2011;13:58–66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>.
- [5] Filippou FC, Popov EP, Bertero VV. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joint (EERC 83-19). 1983.
- [6] Dodd LL, Restrepo-Posada JI. Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel. *J Struct Eng* 1995;121:433–45. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1995\)121:3\(433\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:3(433)).
- [7] Ramberg W, Osgood WR. Description of stress-strain curves by three parameters. 1943.
- [8] Kolozvari K, Orakcal K, Wallace JW. Shear-flexure interaction modeling for reinforced concrete structural walls and columns under reversed cyclic loading. PEER Report 2015/12. 2015.
- [9] Hartloper AR, de Castro e Sousa A, Lignos DG. Constitutive Modeling of Structural Steels: Nonlinear Isotropic/Kinematic Hardening Material Model and Its Calibration. *J Struct Eng* 2021;147:1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002964](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002964).
- [10] Kunnath SK, Heo Y, Mohle JF. Nonlinear Uniaxial Material Model for Reinforcing Steel Bars. *J Struct Eng* 2009;135:335–43. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2009\)135:4\(335\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(335)).
- [11] Gomes A, Appleton J. Nonlinear cyclic stress-strain relationship of reinforcing bars including buckling. *Eng Struct* 1997;19:822–6. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00166-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00166-1).
- [12] Dhakal RP, Maekawa K. Path-dependent cyclic stress–strain relationship of reinforcing bar including buckling. *Eng Struct* 2002;24:1383–96.
- [13] Dhakal RP, Maekawa K. Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement. *J Struct Eng* 2002;128:1139–47. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2002\)128:9\(1139\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:9(1139)).
- [14] Mesa Alvaro. Implementación de un modelo de refuerzo de acero con pandeo en OpenSees (In Spanish). University of Chile, 2021.
- [15] Massone LM, Moroder D. Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Eng Struct* 2009;31:758–67. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.019>.
- [16] Bayrak O, Sheikh S a. Plastic Hinge Analysis. *J Struct Eng* 2001;127:1092–100.

- [17] Cosenza E, Prota A. Experimental behaviour and numerical modelling of smooth steel bars under compression. *J Earthq Eng* 2006;10:313–29. <https://doi.org/10.1080/13632460609350599>.
- [18] Bae S, Miseses AM, Bayrak O. Inelastic Buckling of Reinforcing Bars. *J Struct Eng* 2005;131:314–21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2005\)131:2\(314\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:2(314)).
- [19] Apostolopoulos CA. The Influence of Corrosion and Cross-Section Diameter on the Mechanical Properties of B500c Steel. *J Mater Eng Perform* 2009;18:190–5. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9281-x>.
- [20] Vanama RK, Ramakrishnan B. Improved degradation relations for the tensile properties of naturally and artificially corroded steel rebars. *Constr Build Mater* 2020;249:118706. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118706>.
- [21] Hawileh RA, Abdalla JA, Al Tamimi A, Abdelrahman K, Oudah F. Behavior of corroded steel reinforcing bars under monotonic and cyclic loadings. *Mech Adv Mater Struct* 2011;18:218–24. <https://doi.org/10.1080/15376494.2010.499023>.
- [22] Bertolini, Luca & Elsener, Bernhard & Pedferri, Pietro & Redaelli, Elena & Polder R. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. 2013.
- [23] Apostolopoulos C., Drakakaki A., Basdeki M., Apostolopoulos A. Degradation Laws of Mechanical Properties of Corroded Steel Bar of Existing Structures on Coastal Areas. 10th Int. Symp. Conserv. Monum. Mediterr. Basin Nat. Anthropog. Hazards Sustain. Preserv., Springer International Publishing; 2018, p. 153–9.
- [24] Fernandez I, Berrocal CG. Mechanical Properties of 30 Year-Old Naturally Corroded Steel Reinforcing Bars. *Int J Concr Struct Mater* 2019;13. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0308-x>.
- [25] Imperatore S, Rinaldi Z, Drago C. Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars. *Constr Build Mater* 2017;148:219–30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.209>.
- [26] Ou YC, Susanto YTT, Roh H. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars. *Constr Build Mater* 2016;103:93–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.075>.
- [27] Lee HS, Cho YS. Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion. *Int J Fract* 2009;157:81–8. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9334-7>.
- [28] Taha NA, Morsy M. Study of the behavior of corroded steel bar and convenient method of repairing. *HBRC J* 2016;12:107–13. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcej.2014.11.004>.
- [29] Xia J, Jin W liang, Zhao Y xi, Li L yuan. Mechanical performance of corroded steel bars in concrete. *Proc Inst Civ Eng Struct Build* 2013;166:235–46. <https://doi.org/10.1680/stbu.11.00048>.
- [30] Apostolopoulos CA, Papadopoulos MP, Pantelakis SG. Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt 500s. *Constr Build Mater* 2006;20:782–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.065>.
- [31] Apostolopoulos CA. Mechanical behavior of corroded reinforcing steel bars S500s tempcore

- under low cycle fatigue. *Constr Build Mater* 2007;21:1447–56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.008>.
- [32] Apostolopoulos CA, Papadopoulos MP. Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400. *Constr Build Mater* 2007;21:855–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.012>.
- [33] Bhargava K, Ghosh AK, Mori Y, Ramanujam S. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete-Analytical and empirical models. *Nucl Eng Des* 2007;237:1140–57. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.01.010>.
- [34] Raja VS, Shoji T. *Stress corrosion cracking Theory and Practice*. Woodhead Publishing Limited; 2011.
- [35] Larrosa NO, Akid R, Ainsworth RA. Corrosion-fatigue: a review of damage tolerance models. *Int Mater Rev* 2018;63:283–308. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1375644>.
- [36] Carreño R. *Characterization of Large Diameter Reinforcement Under Large Strain Cyclic Reversals*. University of California San Diego, 2018.
- [37] Kashani MM, Crewe AJ, Alexander NA. Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling. *Eng Struct* 2013;48:417–29. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.034>.
- [38] Kashani MM, Lowes LN, Crewe AJ, Alexander NA. Finite element investigation of the influence of corrosion pattern on inelastic buckling and cyclic response of corroded reinforcing bars. *Eng Struct* 2014;75:113–25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.026>.
- [39] ASTM. *Specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement*. West Conshohocken, PA: ASTM A615/A615M; 2016.
- [40] Fernandez I, Bairán JM, Marí AR. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - ε behavior. *Constr Build Mater* 2015;101:772–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.139>.
- [41] Einscan Shining 3D n.d.
- [42] ANSYS I. ANSYS Workbench 2020 R2 n.d.
- [43] Chaboche JL. Constitutive Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity. *Int J Plast* 1989;5:247–302.
- [44] Medina NR. *Impacto del tipo de corrosión de barras de acero de refuerzo en las propiedades mecánicas y morfología de corrosión*. Universidad de los Andes de Chile, 2019.
- [45] MathWorks. *MATLAB 2014a* 2014.
- [46] Magalh R, Eng S, Engineering E. *Force-based Finite Element for Large Displacement Inelastic Analysis of Frames* 1992.
- [47] Neuenhofer A, Filippou FC. Geometrically Nonlinear Flexibility-Based Frame Finite Element. *J Struct Eng* 1998;124:704–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1998\)124:6\(704\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1998)124:6(704)).
- [48] I. Autodesk, Autodesk Fusion 360.

ANEXOS

ANEXO A.

Tabla 2. Barras de acero de refuerzo ensayadas y diámetros promedio medido.

Código de Barra	Φ [mm]	L/D	Corr (%)	Φ medido [mm]
0804C20	8,0	4,0	20,0	7,45
0804C15	8,0	4,0	15,0	7,48
0804C30	8,0	4,0	30,0	7,39
0804C40	8,0	4,0	40,0	7,21
0812C10	8,0	12,0	10,0	7,64
0812C15	8,0	12,0	15,0	7,53
0812C30	8,0	12,0	30,0	7,37
0812C40	8,0	12,0	40,0	7,17
1004C30	10,0	4,0	30,0	9,08
1004C15	10,0	4,0	15,0	9,36
1004C20	10,0	4,0	20,0	9,18
1004C40	10,0	4,0	40,0	8,84
1012C10	10,0	12,0	10,0	9,45
1012C40	10,0	12,0	40,0	9,32
1204C10	12,0	4,0	10,0	12,03
1204C15	12,0	4,0	15,0	11,62
1204C30	12,0	4,0	30,0	11,02
1204C40	12,0	4,0	40,0	10,84
1212C10	12,0	12,0	10,0	12,10

Código de Barra	Φ [mm]	L/D	Corr (%)	Φ medido [mm]
1212C15	12,0	12,0	15,0	11,67
1212C30	12,0	12,0	30,0	11,10
1212C40	12,0	12,0	40,0	10,88
1604C15	16,0	4,0	15,0	15,44
1604C30	16,0	4,0	30,0	15,29
1612C10	16,0	12,0	10,0	15,92
1612C15	16,0	12,0	15,0	15,49
1612C30	16,0	12,0	30,0	15,17
1612C40	16,0	12,0	40,0	14,95
1015C20	10,0	15,0	20,0	9,11
1012C30	10,0	12,0	30,0	9,01
1015C30	10,0	15,0	30,0	8,98
1612C20	16,0	12,0	20,0	15,8
1212C20	12,0	12,0	20,0	11,21
1204C20	12,0	4,0	20,0	11,18
1604C20	16,0	4,0	20,0	15,23
1604C10	16,0	4,0	10,0	15,62
1604C40	16,0	4,0	40,0	14,78
1008C30	10,0	8,0	30,0	9,05
1008C20	10,0	8,0	20,0	9,17
1012C15	10,0	12,0	15,0	9,32
1008C40	10,0	8,0	40,0	8,87

ANEXO B.

Tabla 3. Valores de parámetros calibrados con modelo OpenSees (Steel02).

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
0804C15	437	186755	0,02	22,90	0,95	0,07	0,06	0,03	0,86	37,81	24,62
0804C20	434	186017	0,02	22,06	0,95	0,06	0,06	0,03	0,84	36,68	28,49
0804C30	429	185136	0,02	20,16	0,95	0,06	0,06	0,02	0,81	34,85	26,33
0804C40	428	184705	0,02	20,46	0,95	0,05	0,06	0,02	0,79	32,43	29,13

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1004C15	457	192352	0,02	16,84	0,94	0,06	0,05	0,03	0,84	57,81	27,35
1004C20	444	186837	0,02	16,76	0,93	0,06	0,05	0,02	0,84	55,30	24,02
1004C30	432	184869	0,03	16,60	0,95	0,06	0,05	0,02	0,83	53,78	25,93
1004C40	427	184623	0,03	16,51	0,95	0,05	0,05	0,01	0,78	47,90	29,50

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1204C10	462	199732	0,02	19,18	0,94	0,15	0,04	0,03	0,85	96,73	27,03
1204C15	468	183516	0,02	20,92	0,95	0,05	0,05	0,03	0,85	89,61	25,36
1204C20	447	197948	0,02	18,86	0,94	0,15	0,04	0,03	0,84	82,47	29,40
1204C30	428	190035	0,02	17,30	0,95	0,13	0,04	0,02	0,81	77,46	28,91
1204C40	427	184869	0,01	18,34	0,95	0,05	0,04	0,01	0,81	74,30	23,84

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1604C10	474	182942	0,02	20,48	0,95	0,05	0,05	0,03	0,828	158,704	25,06
1604C15	474	182942	0,02	20,48	0,95	0,05	0,05	0,03	0,811	151,847	25,06
1604C20	468	181630	0,03	16,18	0,92	0,05	0,05	0,02	0,805	146,615	23,29
1604C30	469	181323	0,03	16,16	0,92	0,06	0,05	0,02	0,803	147,515	19,79
1604C40	442	180810	0,03	16,01	0,94	0,06	0,05	0,02	0,799	137,032	24,68

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1008C20	459	185546	0,01	17,90	0,91	0,08	0,05	0,01	0,89	58,81	20,83
1008C30	456	181938	0,03	16,38	0,93	0,05	0,04	0,03	0,81	52,05	25,96
1008C40	424	183414	0,01	16,41	0,93	0,07	0,05	0,01	0,80	49,49	27,91

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
0812C10	453	183496	0,01	17,64	0,93	0,12	0,04	0,01	0,81	37,18	28,52
0812C15	434	188334	0,01	17,08	0,94	0,09	0,04	0,01	0,81	35,89	25,95
0812C30	427	186571	0,01	16,48	0,93	0,08	0,04	0,01	0,80	34,19	26,31
0812C40	422	180441	0,01	16,22	0,95	0,06	0,05	0,01	0,78	31,50	29,42

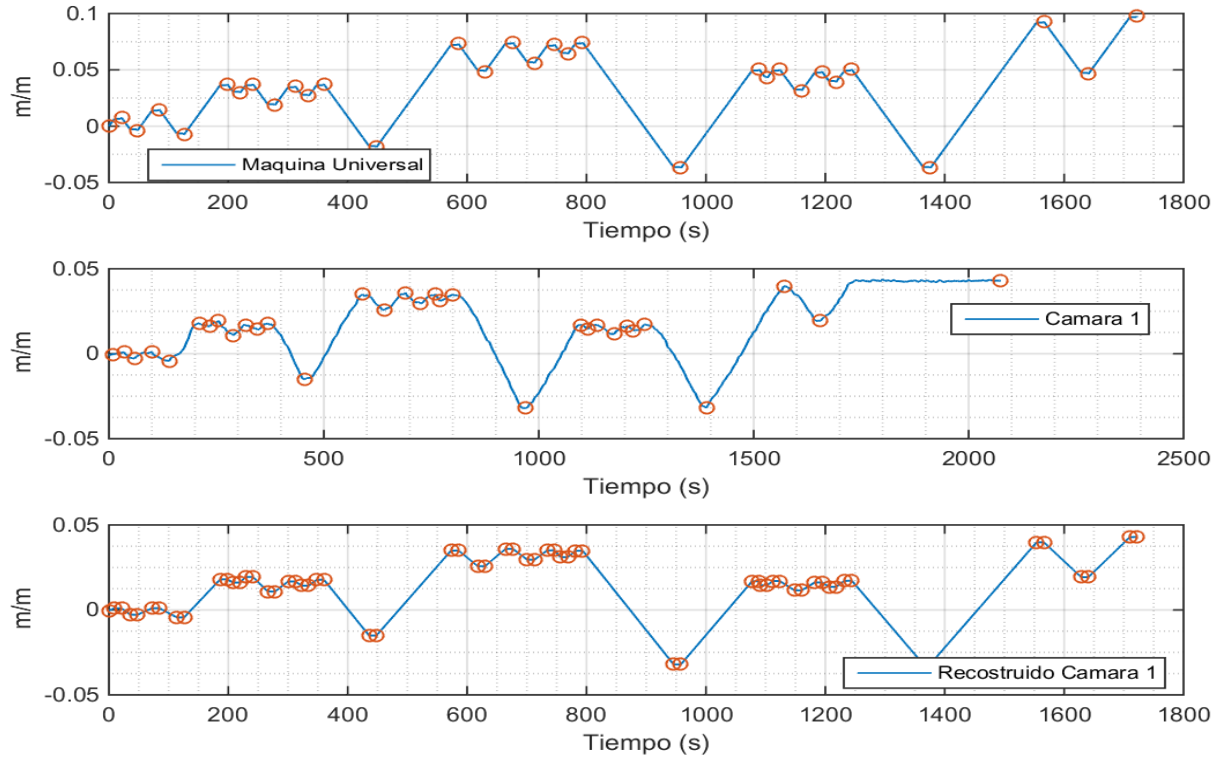
Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1012C10	448	184746	0,01	17,81	0,94	0,12	0,04	0,01	0,80	56,28	28,72
1012C15	435	188969	0,01	17,17	0,94	0,09	0,04	0,01	0,81	55,20	25,49
1012C30	427	184295	0,01	16,40	0,95	0,09	0,04	0,01	0,79	50,32	28,17
1012C40	425	181097	0,01	16,28	0,94	0,08	0,04	0,01	0,77	46,98	29,83

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1212C10	431	181692	0,01	16,00	0,95	0,09	0,03	0,01	0,81	93,38	29,86
1212C15	429	180626	0,01	16,17	0,95	0,10	0,04	0,01	0,79	84,84	29,79
1212C20	424	180482	0,01	16,59	0,95	0,07	0,03	0,01	0,76	74,71	28,09
1212C30	422	180482	0,01	16,58	0,95	0,06	0,03	0,01	0,78	75,74	29,83
1212C40	422	180421	0,01	16,58	0,95	0,06	0,03	0,01	0,77	71,71	29,69

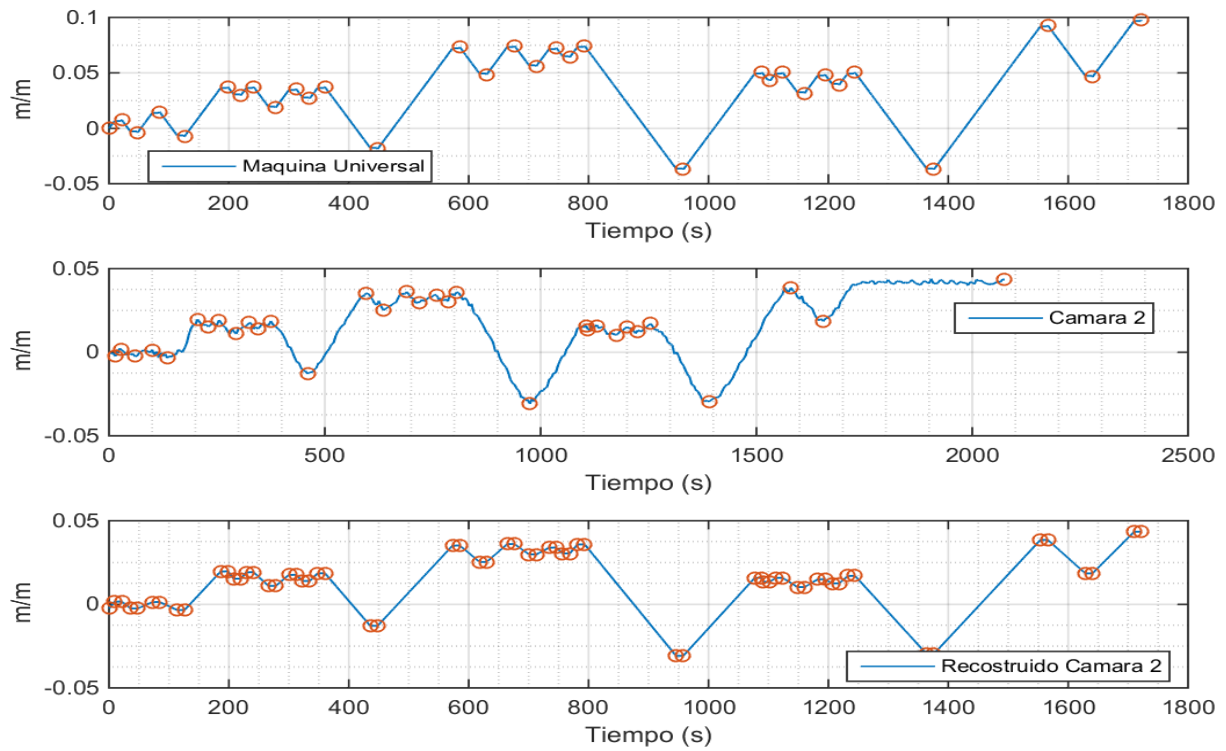
Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1612C10	431	187124	0,02	16,46	0,95	0,13	0,03	0,02	0,81	161,02	29,99
1612C15	426	185915	0,01	17,36	0,95	0,13	0,03	0,02	0,80	150,44	30,00
1612C30	424	183373	0,01	16,56	0,95	0,11	0,03	0,01	0,77	138,83	30,00
1612C40	422	180605	0,01	16,56	0,94	0,07	0,03	0,01	0,76	133,43	29,89

Código de ensayo	Parámetros Steel02										
	F _y (MPa)	E (MPa)	b (-)	R ₀ (-)	cR ₁ (-)	cR ₂ (-)	a ₁ (-)	a ₃ (-)	%A _T (-)	A _T (mm ²)	Error (%)
1015C20	431	187145	0,01	17,87	0,95	0,12	0,04	0,02	0,80	52,20	29,60
1015C30	423	182922	0,01	16,37	0,95	0,07	0,03	0,01	0,78	49,41	28,78

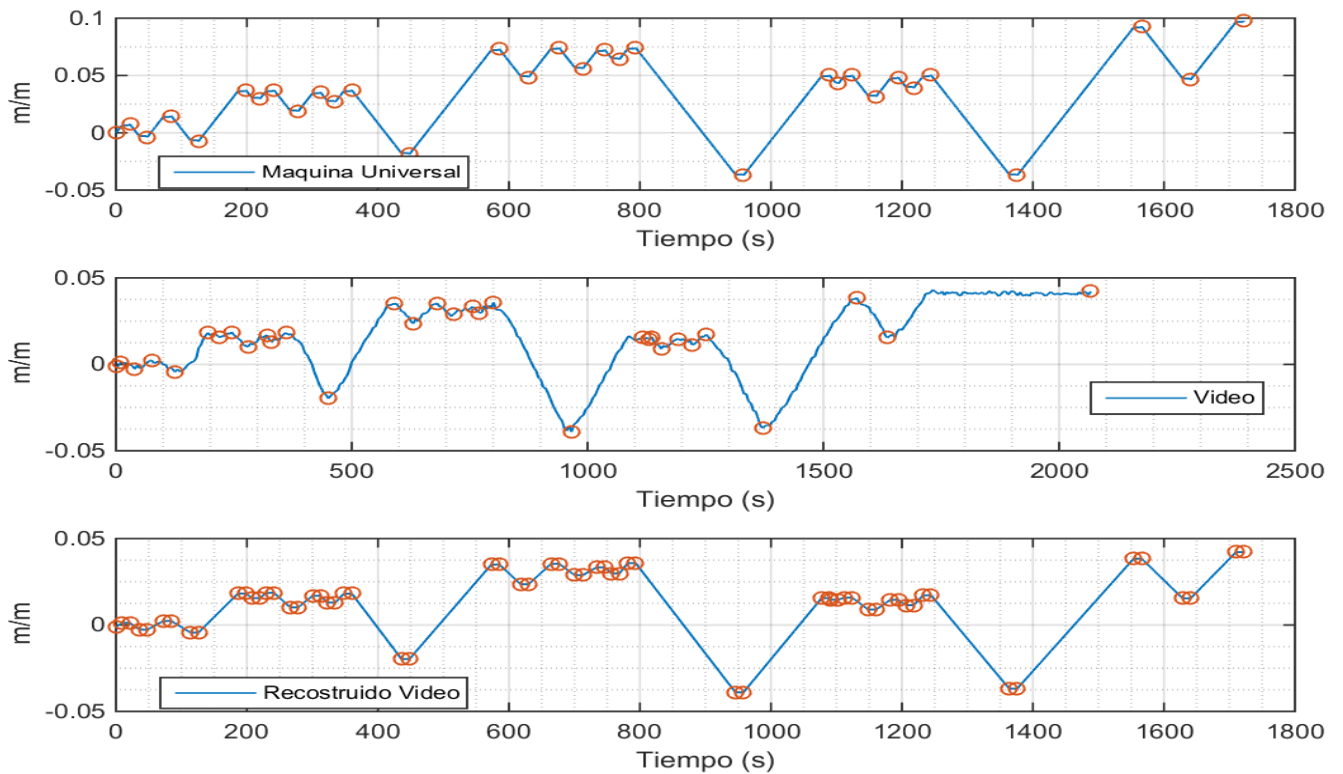
ANEXO C



(a)



(b)



(c)

Figura 21 – Sincronización de los tiempos de fotogrametría con el tiempo de la máquina universal para barra de diámetro

$d = 10$ (mm), $L/D = 4$, Corrosión = 20%. (a) Reconstitución de cámara 1. (b) Reconstitución de cámara 2.
(c) Reconstitución de dispositivo de video.