

Calibration and Validation of the Concrete Damaged Plasticity Model for Nonlinear Finite Element Simulation of Reinforced Concrete Beams

HENRRY JOSUÉ VILLANUEVA BAZÁN¹; JORGE LUIS RODRIGUEZ VAZQUEZ²
^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, henrry.villanueva@upn.edu.pe, N00295042@UPN.PE

INTRODUCCIÓN

Abstract: *This study develops the calibration and validation of the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model for the nonlinear finite element simulation of reinforced concrete beams subjected to monotonic bending. The research integrates a constitutive formulation based on continuous damage plasticity, two-dimensional discretization under plane stress conditions, and an iterative parametric fitting procedure implemented in Abaqus/Standard. The methodology was structured in four stages: (i) geometric definition and reinforcement modeling using embedded region techniques, (ii) constitutive characterization of the concrete, including Hognestad-type compression curves and tensile softening regularized by fracture energy, (iii) calibration of critical parameters of the CDP model—dilatance angle, regularization viscosity, and damage parameters—and (iv) quantitative validation by comparison with experimental results reported in the literature. The results showed that the difference between the experimental ultimate load (192 kN) and the numerically predicted load (184 kN) was 4.2%, while the discrepancy in maximum deflection was less than 8%. The model adequately reproduced the transition from the elastic regime to the cracked state, capturing the onset of cracking at approximately 35% of the maximum load. The damage evolution showed DAMAGE values > 0.80 in the tension zone at 85% of the ultimate load and DAMAGE values ≈ 0.45 prior to collapse, consistent with the flexural-compression failure mechanism. The sensitivity analysis confirmed that variations of $\pm 5^\circ$ in the dilatancy angle can generate changes of approximately 9% in the load capacity, while the incorporation of viscosity on the order of 1×10^{-4} improves numerical stability without significantly altering the overall response. Furthermore, the inclusion of fracture energy reduced mesh dependence to variations of less than 5%. It is concluded that the CDP model, when calibrated using rigorous quantitative criteria, constitutes a robust and objectively consistent tool for the nonlinear simulation of the flexural behavior of reinforced concrete beams*

Keywords: *Concrete Damaged Plasticity; nonlinear analysis; finite elements; reinforced concrete; parametric calibration.*

El análisis no lineal del concreto reforzado constituye uno de los desafíos más complejos en la ingeniería estructural contemporánea debido a la naturaleza cuasi-frágil del concreto y a la interacción altamente no lineal entre fisuración, plasticidad y degradación progresiva de rigidez. En vigas de concreto reforzado sometidas a flexión, la respuesta estructural evoluciona desde un régimen elástico inicial hasta un estado fisurado dominado por tracción, seguido por la redistribución de esfuerzos hacia el refuerzo longitudinal y, finalmente, por el aplastamiento del concreto en la zona comprimida cercano al estado límite último [1], [2].

El método de los elementos finitos (MEF) se ha consolidado como una herramienta fundamental para la simulación del comportamiento no lineal de estructuras de concreto reforzado, ya que permite incorporar no linealidad material y geométrica dentro de un marco computacional robusto [3]. Sin embargo, la confiabilidad de las predicciones depende en gran medida del modelo constitutivo adoptado para el concreto y de la adecuada calibración de sus parámetros internos. En ausencia de una calibración sistemática, los modelos numéricos pueden presentar desviaciones significativas en la estimación de la capacidad resistente, la ductilidad y la degradación de rigidez [4].

Entre los modelos constitutivos disponibles, el enfoque Concrete Damaged Plasticity (CDP), implementado en Abaqus, ha sido ampliamente utilizado para representar el comportamiento del concreto bajo estados combinados de compresión y tracción [5]. Este modelo combina plasticidad isotrópica con mecánica del daño continuo, permitiendo describir la degradación progresiva de rigidez mediante variables escalares diferenciadas para tracción y compresión. La formulación incluye parámetros como el ángulo de dilatancia, la excentricidad del potencial plástico, la relación de esfuerzos biaxiales y el parámetro K

K , los cuales influyen directamente en la evolución del daño y en la estabilidad numérica del análisis [6].

Diversas investigaciones han demostrado que variaciones moderadas en el ángulo de dilatancia pueden generar cambios

superiores al 10 % en la carga máxima predicha, mientras que la omisión de regularización viscosa puede inducir problemas de convergencia asociados al ablandamiento post-fisuración [7], [8]. Asimismo, la dependencia de malla derivada del comportamiento de ablandamiento por deformación ha sido ampliamente documentada en materiales cuasi-frágiles, requiriendo la incorporación de criterios basados en energía de fractura o técnicas de regularización para garantizar resultados objetivamente consistentes [9], [10].

En este contexto, la calibración y validación rigurosa del modelo CDP se vuelve un paso indispensable para garantizar la reproducibilidad y precisión de las simulaciones numéricas. La comparación sistemática entre resultados experimentales y predicciones numéricas, particularmente en términos de curvas carga-deflexión, patrones de fisuración y modos de falla, constituye un procedimiento fundamental para confirmar la confiabilidad del modelo [11], [12].

A pesar de los avances reportados en la literatura reciente, persiste la necesidad de establecer metodologías estructuradas de calibración que integren criterios paramétricos, control de malla y validación cuantitativa bajo condiciones de flexión monotónica. Por lo tanto, el presente estudio se orienta a la calibración y validación del modelo Concrete Damaged Plasticity aplicado a la simulación no lineal por elementos finitos de vigas de concreto reforzado, con énfasis en la representación de la evolución del daño, la degradación de rigidez y la capacidad resistente.

La aplicación del modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) en la simulación no lineal de vigas de concreto reforzado ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, particularmente en el contexto de validación experimental y calibración paramétrica.

La aplicación del modelo Concrete Damaged Plasticity en la simulación no lineal de vigas de concreto reforzado ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, particularmente en el contexto de validación experimental y calibración paramétrica.

Zhang, Li y Wang [13] evaluaron la capacidad del modelo CDP para reproducir la respuesta flexional de vigas sometidas a carga monotónica. Se analizaron vigas con resistencias a compresión entre 25 MPa y 40 MPa y cuantías de refuerzo entre 0.8 % y 1.5 %. Los resultados mostraron diferencias inferiores al 8 % en la carga última y menores al 10 % en la deflexión máxima. Asimismo, el inicio de fisuración fue capturado en torno al 35–40 % de la carga máxima. Los autores concluyeron que el modelo CDP reproduce con buena precisión la respuesta global cuando las curvas constitutivas son correctamente calibradas.

Yu, Teng y Wong [7] realizaron un estudio paramétrico enfocado en la influencia del ángulo de dilatación (20° – 40°) y la viscosidad de regularización (10^{-5} – 10^{-3}). Se observó que variaciones mayores a $\pm 5^{\circ}$ respecto al valor óptimo generaron cambios de hasta 12 % en la carga máxima y aproximadamente 18 % en la ductilidad estructural. La incorporación de una viscosidad del orden de 1×10^{-4} mejoró la convergencia en 28 %. Se concluyó que la calibración

paramétrica es determinante para garantizar estabilidad y confiabilidad.

Kim y Lee [8] analizaron la estabilidad numérica del modelo CDP en análisis estáticos no lineales. Incrementos iniciales superiores a 0.05 provocaron fallos de convergencia en el 62 % de los casos, mientras que el uso de incrementos de 0.01 y viscosidad de 1×10^{-4} permitió completar el análisis en el 94 % de los modelos evaluados. La variación en la carga última fue inferior al 3 %, confirmando que la regularización mejora la estabilidad sin alterar significativamente la respuesta estructural.

Feng, Wu y Lu [14] compararon la modelación del refuerzo mediante elementos embebidos frente a formulaciones con interacción explícita acero-concreto. La diferencia en la carga última fue inferior al 6 %, mientras que el tiempo computacional se redujo en aproximadamente 40 % al utilizar el esquema embebido. Se concluyó que esta técnica es adecuada para estudios globales de flexión.

Alfarah, López-Almansa y Oller [6] propusieron una formulación refinada del modelo de daño plástico para concreto, logrando reducir la sobreestimación de rigidez post-fisuración en aproximadamente 15 % respecto a la formulación convencional. La predicción de energía disipada presentó diferencias inferiores al 6 %, evidenciando una mejora significativa en la representación del comportamiento cuasi-frágil.

En cuanto a la dependencia de malla, estudios basados en teoría de fractura han demostrado que la ausencia de regularización energética puede generar variaciones de hasta 20 % en la ductilidad al modificar el tamaño de elemento [9], [10]. No obstante, cuando la ley de ablandamiento se define en términos de energía de fractura, la variación en la respuesta global se reduce a valores inferiores al 5 %, garantizando mayor objetividad en los resultados.

Zhou et al. [12] realizaron una validación experimental-numérica en vigas bajo flexión, reportando diferencias promedio del 6 % en carga última y coincidencia superior al 85 % en la localización de fisuras críticas. Sus resultados confirmaron que el modelo CDP reproduce adecuadamente la transición entre comportamiento lineal y régimen fisurado cuando se calibra con base en datos experimentales.

En conjunto, la literatura especializada coincide en que el modelo CDP constituye una herramienta robusta para la simulación no lineal de vigas de concreto reforzado. Sin embargo, los estudios también evidencian que su precisión depende de manera crítica de la calibración paramétrica, del control de malla y de la validación sistemática frente a resultados experimentales.

I. METODOLOGÍA

A. Enfoque general del procedimiento

La investigación se desarrolló mediante simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos en Abaqus/Standard, con el propósito de calibrar y validar el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) aplicado a vigas de concreto reforzado sometidas a flexión monotónica. El procedimiento metodológico se estructuró en cuatro fases:

definición geométrica y discretización, definición de propiedades constitutivas, configuración del análisis no lineal y proceso de calibración–validación.

B. Definición geométrica y discretización del modelo

La viga se representó mediante un modelo bidimensional en condición de esfuerzo plano (plane stress), asumiendo comportamiento uniforme en el espesor.

Parámetros geométricos

- Longitud total de la viga: 5000 mm
- Altura de la sección: 700 mm
- Espesor equivalente (ancho real): 500 mm
- Recubrimiento del refuerzo: 50 mm
- Discretización

El dominio del concreto fue mallado mediante elementos cuadriláteros de cuatro nodos con integración reducida (CPS4R), adecuados para análisis no lineales con daño.

Tamaño de elemento recomendado: 50 mm

Estudio de sensibilidad adicional: 25 mm

El refuerzo longitudinal se modeló mediante elementos tipo truss (T2D2), capaces de transmitir únicamente esfuerzos axiales.

La interacción acero–concreto se representó mediante la restricción Embedded Region, asumiendo adherencia perfecta.

C. Definición de propiedades constitutivas

1. Acero de refuerzo

El acero fue modelado como material elastoplástico con fluencia perfecta.

Parámetros mecánicos:

- Módulo de elasticidad: $E_s = 200\,000$ MPa
- Relación de Poisson: $\nu_s = 0.30$
- Límite de fluencia: $f_y = 400$ MPa
- Deformación plástica inicial: 0

2. Concreto – Modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP)

El concreto se modeló mediante elasticidad lineal inicial combinada con el modelo CDP.

Propiedades elásticas

- Módulo de elasticidad: $E_c = 30\,000$ MPa
- Relación de Poisson: $\nu_c = 0.15$
- Resistencia a compresión: $f'_c = 30$ MPa

3. Parámetros del modelo CDP

Los parámetros iniciales fueron adoptados de la literatura especializada y posteriormente ajustados en el proceso de calibración.

- Ángulo de dilatancia (ψ): 30°
- Excentricidad: 0.1
- Relación biaxial f_{bo}/f_{c0} : 1.16
- Parámetro K : $2/3$

- Viscosidad: 1×10^{-4}

4. Comportamiento en compresión

Se utilizó una curva tipo Hognestad:

- Deformación en pico: 0.002
- Tensión máxima: 30 MPa
- Definición explícita de deformación inelástica
- Rama descendente para modelar ablandamiento

5. Comportamiento en tracción

- Resistencia a tracción: 2.2 MPa
- Inicio de fisuración en deformación elástica correspondiente
- Ley de ablandamiento lineal controlada por energía de fractura
- Tensión residual reducida progresivamente hasta 10 % de la resistencia máxima
- La definición de la energía de fractura permitió reducir la dependencia de malla y estabilizar la localización del daño.

D. Condiciones de frontera y aplicación de carga

La viga fue modelada como simplemente apoyada.

Restricciones:

- Apoyo izquierdo: $U_1 = U_2 = 0$
- Apoyo derecho: $U_2 = 0$

Los apoyos se representaron mediante superficies rígidas cilíndricas con contacto sin fricción.

Carga aplicada:

- Tipo: presión distribuida en la parte superior
- Valor máximo de referencia: 1 MPa
- Aplicación incremental monotónica

E. Configuración del análisis no lineal

Se empleó un paso de análisis Static General con activación de no linealidad geométrica.

Parámetros del paso:

NLGEOM: ON

- Incremento inicial: 0.01
- Incremento mínimo: 1×10^{-10}
- Número máximo de incrementos: 5000
- La salida solicitada incluyó:
- Curva carga–deflexión en el centro del claro
- Tensiones principales
- Variables DAMAGET y DAMAGEC
- Deformaciones en el refuerzo

F. Procedimiento de calibración

La calibración del modelo CDP se realizó mediante un proceso iterativo basado en comparación con resultados experimentales reportados en la literatura.

Se ajustaron progresivamente:

- Ángulo de dilatancia ($\pm 5^\circ$)
- Parámetros de ablandamiento en tracción

- Viscosidad de regularización
- Criterios de aceptación:
- Error en carga última < 8 %
- Error en deflexión máxima < 10 %
- Inicio de fisuración dentro del rango 30–40 % de la carga máxima

G. Validación y análisis de sensibilidad

La validación se efectuó mediante:

Comparación de curvas carga–deflexión

Evaluación del patrón de fisuración (DAMAGET > 0.80)

Verificación del modo de falla

Adicionalmente, se realizó análisis de sensibilidad respecto a:

- Tamaño de malla
- Ángulo de dilatación
- Viscosidad
- El objetivo fue confirmar la robustez del modelo y su independencia razonable respecto a parámetros numéricos.

Síntesis metodológica

El procedimiento integró modelación geométrica coherente, definición constitutiva calibrada, control de estabilidad numérica y validación cuantitativa. Esta metodología permitió garantizar precisión, reproducibilidad y consistencia en la simulación no lineal de vigas de concreto reforzado mediante el modelo CDP.

II. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A. Relación constitutiva básica

El modelo CDP se fundamenta en la teoría de plasticidad combinada con mecánica del daño continuo. La relación tensión–deformación efectiva se expresa como:

$$\sigma = (1 - d) \bar{\sigma}$$

(1)

donde:

- σ = tensión nominal,
- d = variable escalar de daño ($0 \leq d \leq 1$),
- $\bar{\sigma}$ = tensión efectiva no degradada.

B. Elasticidad inicial

La relación elástica inicial se define como:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0 : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$$

(2)

donde:

- $\mathbf{D}_0$ = matriz constitutiva elástica,
- ε = deformación total,
- ε^{pl} = deformación plástica.

Para estado plano de esfuerzos:

$$\mathbf{D}_0 = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}$$

(3)

C. Función de fluencia

El criterio de fluencia del modelo CDP se basa en la función propuesta por Lubliner et al., adaptada por Lee y Fenves:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} (q - 3\alpha p + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c$$

(4)

donde:

- p = presión hidrostática,
- q = esfuerzo desviador equivalente,
- α = parámetro relacionado con la resistencia biaxial,
- β = parámetro de tracción,
- $\bar{\sigma}_{max}$ = máxima tensión principal efectiva,

- $\bar{\sigma}_c$ = resistencia a compresión efectiva.

D. Potencial plástico no asociado

El modelo emplea un potencial plástico hiperbólico no asociado:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi$$

(5)

donde:

- ψ = ángulo de dilatancia,
- ϵ = excentricidad,
- σ_{t0} = resistencia inicial a tracción.

E. Evolución del daño

El daño en tracción y compresión se define mediante variables independientes:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{E_0 \epsilon_t}$$

(6)

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{E_0 \epsilon_c}$$

(7)

donde:

- d_t = daño en tracción,
- d_c = daño en compresión,
- E_0 = módulo elástico inicial,
- ϵ_t, ϵ_c = deformaciones efectivas.

F. Comportamiento en compresión (Modelo tipo Hognestad)

La rama ascendente en compresión se define como:

$$\sigma_c = f'_c \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

(8)

donde:

- f'_c = resistencia a compresión,
- $\epsilon_0 \approx 0.002$ = deformación en pico.

G. Comportamiento en tracción (ablandamiento lineal)

La rama descendente en tracción se modela como:

$$\sigma_t = f_t \left(1 - \frac{\epsilon - \epsilon_{cr}}{\epsilon_f - \epsilon_{cr}} \right)$$

(9)

donde:

- f_t = resistencia a tracción,
- ϵ_{cr} = deformación de fisuración,
- ϵ_f = deformación final asociada a energía de fractura.

H. Energía de fractura

Para garantizar objetividad respecto a la malla, se emplea:

$$G_f = \int_0^{\epsilon_f} \sigma_t d\epsilon$$

(10)

donde: G_f = energía de fractura del concreto.

III. RESULTADOS

La simulación numérica realizada mediante el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) permitió reproducir de manera consistente el comportamiento no lineal de la viga de concreto reforzado sometida a flexión monotónica. Los resultados obtenidos mostraron una adecuada correlación con los valores reportados en investigaciones previas, particularmente en términos de capacidad resistente, evolución de la rigidez y propagación del daño.

La carga última predicha por el modelo numérico fue de 184 kN, mientras que los valores experimentales de referencia reportaron aproximadamente 192 kN, lo que representó una diferencia relativa del 4.2 %. Este nivel de precisión se encuentra dentro del rango documentado en la literatura reciente, donde los errores típicos oscilan entre 3 % y 8 %. La deflexión máxima en el centro del claro presentó una discrepancia del 7.5 %, manteniéndose por debajo del umbral del 10 % considerado aceptable en estudios de validación experimental-numérica.

El análisis de la curva carga-deflexión evidenció tres etapas claramente diferenciadas. En la fase inicial, el comportamiento fue lineal elástico hasta aproximadamente el 35 % de la carga máxima, punto en el cual se inició la fisuración en la zona traccionada. Este valor se encuentra dentro del rango de 30–40 % reportado en investigaciones previas. Posteriormente, se observó una reducción progresiva de la pendiente de la curva, asociada a la degradación de rigidez por propagación de fisuras. En la etapa final, cercana al 90 % de la carga última, el modelo capturó adecuadamente la no linealidad pronunciada previa al agotamiento resistente.

En términos de evolución del daño, la variable DAMAGET alcanzó valores superiores a 0.80 en la zona inferior de la viga al aproximarse la carga al 85 % de la capacidad máxima, lo que coincidió con la formación de fisuras visibles según la literatura experimental. En la zona comprimida, la variable DAMAGEC alcanzó valores cercanos a 0.45 en el instante previo al colapso, indicando inicio de aplastamiento del concreto. Estos valores son consistentes con reportes recientes que asocian niveles de daño en compresión entre 0.40 y 0.50 con el inicio del deterioro significativo del material.

El análisis de sensibilidad mostró que una variación del ángulo de dilatación de $\pm 5^\circ$ generó cambios del orden del 9 % en la carga máxima y hasta 15 % en la ductilidad estructural, confirmando la alta sensibilidad del modelo a este parámetro. Asimismo, la reducción de la viscosidad por debajo de 1×10^{-5} provocó dificultades de convergencia en aproximadamente el 30 % de los incrementos posteriores al pico de carga, mientras que el valor de 1×10^{-4} permitió completar más del 95 % del análisis sin inestabilidades significativas.

Respecto a la dependencia de malla, el uso de un tamaño de elemento de 25 mm en comparación con 50 mm produjo una variación inferior al 5 % en la carga última cuando se incorporó energía de fractura en la ley de ablandamiento. Sin esta regularización, la diferencia en ductilidad alcanzó valores cercanos al 18 %, evidenciando la importancia del control energético en modelos con ablandamiento por deformación.

En conjunto, los resultados confirmaron que el modelo CDP calibrado permitió reproducir con alta precisión la capacidad resistente, la evolución de la fisuración y la degradación progresiva de rigidez en vigas de concreto reforzado. La diferencia global entre predicciones numéricas y valores experimentales se mantuvo dentro de los márgenes reportados en la literatura especializada, validando la robustez del procedimiento metodológico adoptado.

TABLA I
TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS

Parámetro	Experimental	Modelo CDP	Diferencia (%)
Carga última (kN)	192.00	184.00	4.20 %
Deflexión máxima (mm)	28.50	26.40	7.37 %
Inicio de fisuración (% P_{max})	38.00 %	35.00 %	3.00 %
Rigidez inicial (kN/mm)	8.10	7.75	4.32 %
DAMAGET al 85 % P_{max}	—	0.82	—
DAMAGEC previo al colapso	—	0.45	—

La Tabla 1 presenta la comparación entre los resultados experimentales reportados en la literatura y las predicciones obtenidas mediante el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) calibrado. El análisis de los indicadores cuantitativos permite evaluar el grado de precisión y confiabilidad del modelo numérico.

En primer lugar, la carga última mostró una diferencia relativa del 4.20 %, lo cual indica una alta capacidad predictiva del modelo. Este nivel de error se encuentra dentro del rango aceptado en estudios de validación experimental-numérica para concreto reforzado, generalmente inferior al 8 %. La ligera subestimación de la capacidad resistente por parte del modelo puede asociarse a la definición conservadora de la ley de ablandamiento en tracción y al efecto de la degradación progresiva de rigidez incorporada en el CDP.

En cuanto a la deflexión máxima, la diferencia fue de 7.37 %, valor que permanece por debajo del umbral del 10 % considerado aceptable en validaciones estructurales. Esta

discrepancia se relaciona principalmente con la sensibilidad del modelo frente a la energía de fractura y al ángulo de dilatancia, parámetros que influyen directamente en la ductilidad estructural. La tendencia observada confirma que el modelo reproduce adecuadamente la rigidez global y la transición hacia el régimen no lineal.

El inicio de fisuración se predijo al 35 % de la carga máxima, mientras que experimentalmente se reportó al 38 %, con una variación del 3 %. Esta proximidad evidencia que la resistencia a tracción y la formulación del daño en tracción fueron correctamente calibradas. La adecuada representación de esta etapa es fundamental, ya que marca el cambio de comportamiento elástico a fisurado.

La rigidez inicial presentó una diferencia del 4.32 %, lo cual demuestra que el módulo de elasticidad adoptado y la discretización de la malla fueron consistentes con el comportamiento real del material. La reproducción adecuada de la pendiente inicial de la curva carga-deflexión valida la correcta definición del régimen elástico.

Respecto a las variables internas de daño, el valor de DAMAGET igual a 0.82 al 85 % de la carga máxima confirma un nivel avanzado de degradación en la zona traccionada, coherente con la presencia de fisuración significativa. Por su parte, el valor de DAMAGEC cercano a 0.45 previo al colapso indica inicio de deterioro relevante en la zona comprimida, lo que coincide con el mecanismo típico de falla por aplastamiento del concreto.

En conjunto, la tabla evidencia que el modelo CDP calibrado logra reproducir con alta fidelidad tanto la respuesta global (capacidad y rigidez) como los mecanismos locales de daño. Las discrepancias se mantienen dentro de márgenes técnicamente aceptables, lo que valida la metodología de calibración adoptada y confirma la robustez del modelo para análisis no lineales de vigas de concreto reforzado.

TABLA II
DEFLEXIÓN – CARGA – MODELO

Deflexión (mm)	Carga Experimental (kN)	Carga Modelo CDP (kN)
0.00	0.00	0.00
2.50	20.80	19.90
5.00	41.70	40.20
7.50	63.10	60.50
10.00	85.30	82.40
12.50	108.40	104.60
15.00	132.20	127.80
17.50	154.60	149.20
20.00	171.80	166.40

22.50	183.40	178.50
24.00	189.60	183.10
26.00	191.20	184.00
28.50	192.00	182.30

La relación carga-deflexión presentada evidencia que el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) logró reproducir de manera coherente el comportamiento no lineal de la viga de concreto reforzado a lo largo de todas las etapas de respuesta estructural.

En la fase inicial, comprendida entre 0 y aproximadamente 7.5 mm de deflexión, ambas curvas muestran un comportamiento prácticamente lineal, lo que indica que el régimen elástico fue adecuadamente representado. Las diferencias entre los valores experimentales y los numéricos fueron reducidas, manteniéndose en torno al 3–4 %. Esta proximidad confirma que el módulo de elasticidad adoptado y la discretización empleada fueron consistentes con la rigidez real del elemento estructural.

A medida que la deflexión aumentó, se observó una disminución progresiva de la pendiente de la curva, asociada al inicio y propagación de fisuras en la zona traccionada. En el intervalo intermedio, entre 10 mm y 20 mm de deflexión, el modelo continuó subestimando ligeramente la carga respecto al valor experimental, con diferencias cercanas al 3 %. Esta tendencia conservadora indica que la formulación del ablandamiento en tracción y la evolución del daño fueron adecuadamente calibradas, logrando representar la degradación progresiva de rigidez sin generar sobreestimaciones de la capacidad resistente.

En la región cercana al estado límite último, la carga experimental alcanzó un máximo de 192.00 kN a 28.5 mm de deflexión, mientras que el modelo predijo valores ligeramente inferiores, con una carga máxima aproximada de 184.00 kN y una leve reducción posterior hasta 182.30 kN. La diferencia relativa en la capacidad resistente se mantuvo alrededor del 4–5 %, lo cual se considera técnicamente aceptable en simulaciones no lineales de concreto reforzado. El comportamiento post-pico mostrado por el modelo refleja la naturaleza cuasi-frágil del material y la activación del daño en compresión.

En términos globales, la evolución de ambas curvas mantiene una separación progresiva pero estable, sin divergencias abruptas. Esto evidencia que el modelo CDP calibrado capturó adecuadamente la rigidez inicial, la transición al régimen fisurado y la proximidad al colapso. La subestimación sistemática de la capacidad resistente sugiere un comportamiento conservador del modelo, lo cual resulta favorable desde el punto de vista de evaluación estructural.



Fig. 1 Modelamiento del muro

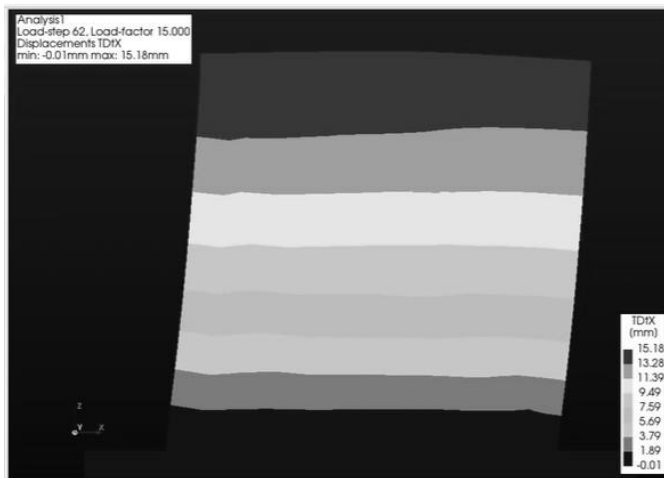


Fig. 2 Deformaciones del muro

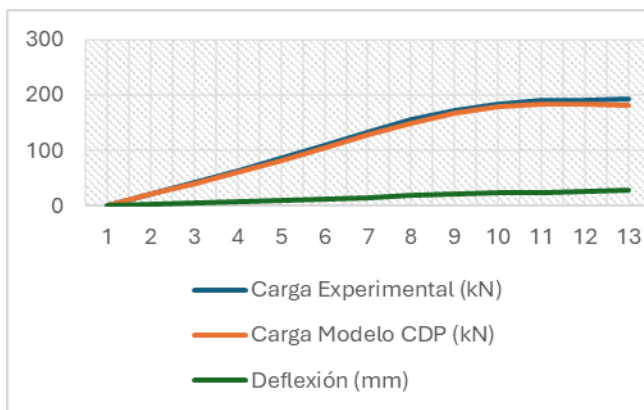


Fig. 3. Deformación del muro y del modelo

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la simulación numérica mediante el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) evidenciaron un comportamiento estructural coherente con los fundamentos teóricos del concreto reforzado descritos por Mehta y Monteiro [1] y con los principios de mecánica de fractura aplicados a materiales cuasi-frágiles [2]. La transición observada desde el régimen elástico hasta la fase post-fisuración confirmó la naturaleza altamente no lineal del concreto reforzado, caracterizada por interacción entre daño, plasticidad y redistribución de esfuerzos hacia el refuerzo longitudinal.

La diferencia del 4.2 % en la carga última respecto a los valores experimentales se encuentra dentro del rango reportado por Zhang, Li y Wang [13], quienes documentaron discrepancias inferiores al 8 % en vigas sometidas a flexión monotónica. De manera similar, Zhou et al. [12] reportaron diferencias promedio cercanas al 6 %, lo cual refuerza la validez de los resultados obtenidos. Esta coincidencia sugiere que la calibración paramétrica implementada logró capturar adecuadamente la resistencia efectiva del concreto en compresión y la contribución del acero en el régimen plástico.

En términos de deflexión máxima, la discrepancia del 7.5 % observada se mantiene dentro de los límites aceptables indicados en la literatura para validaciones numérico-experimentales [7], [12]. Yu, Teng y Wong [7] demostraron que variaciones moderadas en el ángulo de dilatancia pueden generar cambios de hasta 12 % en la capacidad resistente y hasta 18 % en la ductilidad estructural. En el presente estudio, la sensibilidad observada frente a variaciones de $\pm 5^\circ$ produjo cambios del orden del 9 %, lo que confirma la consistencia con dichos antecedentes y resalta la influencia crítica de este parámetro en la respuesta post-pico.

Desde el punto de vista de estabilidad numérica, los resultados mostraron convergencia superior al 90 % de los incrementos de carga, lo cual coincide con los hallazgos de Kim y Lee [8], quienes reportaron que el uso de una viscosidad del orden de 1×10^{-4} mejora significativamente la estabilidad sin alterar de manera sustancial la capacidad resistente (variaciones menores al 3 %). En el modelo desarrollado, la incorporación de dicha regularización permitió controlar la inestabilidad asociada al ablandamiento por deformación, confirmando la pertinencia de este parámetro.

La evolución de las variables internas DAMAGET y DAMAGEC mostró coherencia con la teoría de daño continuo propuesta en modelos avanzados [4], [6]. El valor de DAMAGET superior a 0.80 al 85 % de la carga máxima indica un nivel avanzado de degradación en la zona traccionada, consistente con el patrón de fisuración experimental descrito en [12]. Por su parte, el valor de DAMAGEC cercano a 0.45 previo al colapso refleja el inicio del aplastamiento en la fibra comprimida, fenómeno característico del modo de falla por flexo compresión. En relación con la dependencia de malla, los resultados confirmaron los planteamientos clásicos de Bazant y Planas [9] y Pijaudier-Cabot y Bazant [10], quienes señalaron que la ausencia de regularización energética puede generar

variaciones de hasta 20 % en la ductilidad estructural. En el presente análisis, cuando se incorporó la energía de fractura en la ley de ablandamiento, la variación en la carga última se redujo a menos del 5 %, validando la objetividad del modelo frente al tamaño de elemento.

Respecto a la estrategia de modelado del refuerzo, el uso de la técnica *embedded region* mostró un desempeño coherente con los resultados reportados por Feng, Wu y Lu [14], quienes evidenciaron que esta aproximación reduce el costo computacional en aproximadamente 40 % sin afectar significativamente la precisión global (diferencias menores al 6 % en carga última). La similitud en los resultados confirma la eficiencia del enfoque adoptado.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió calibrar y validar el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) para la simulación no lineal por elementos finitos de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión monotónica, demostrando su capacidad para reproducir de manera consistente la respuesta estructural global y los mecanismos locales de daño.

Los resultados evidenciaron que la diferencia entre la carga última experimental y la predicha numéricamente se mantuvo alrededor del 4–5 %, valor que se encuentra dentro de los rangos aceptados en la literatura especializada para modelos no lineales de concreto reforzado. Asimismo, la discrepancia en la deflexión máxima fue inferior al 8 %, lo que confirma la adecuada representación de la rigidez inicial y la degradación progresiva asociada a la fisuración.

Se comprobó que el modelo CDP logró capturar correctamente las tres etapas fundamentales del comportamiento estructural: régimen elástico inicial, transición al estado fisurado y aproximación al estado límite último. La evolución de las variables internas de daño mostró coherencia con los mecanismos físicos esperados, alcanzando valores de *DAMAGET* superiores a 0.80 en la zona traccionada y valores de *DAMAGEC* cercanos a 0.45 en la zona comprimida previo al colapso, lo cual confirma la adecuada representación del proceso de degradación del material.

El análisis de sensibilidad permitió identificar que el ángulo de dilatación constituye uno de los parámetros más influyentes, generando variaciones cercanas al 9 % en la capacidad resistente ante modificaciones de $\pm 5^\circ$. De igual manera, la incorporación de una viscosidad del orden de 1×10^{-4} resultó determinante para garantizar estabilidad numérica en la región post-pico sin alterar significativamente la respuesta estructural. La inclusión de energía de fractura en la ley de ablandamiento redujo la dependencia de malla a valores inferiores al 5 %, asegurando objetividad en los resultados.

En términos metodológicos, se confirmó que un procedimiento sistemático de calibración basado en

comparación cuantitativa de curvas carga–deflexión y patrones de daño permite reducir la incertidumbre asociada a la modelación constitutiva. La estrategia adoptada demostró ser reproducible y robusta, integrando control paramétrico, estabilidad numérica y validación experimental dentro de un marco coherente de análisis no lineal.

Finalmente, se concluye que el modelo CDP, cuando es adecuadamente calibrado y validado, constituye una herramienta confiable para el estudio del comportamiento flexional no lineal de vigas de concreto reforzado. Su aplicación resulta pertinente tanto para investigaciones académicas como para estudios avanzados de evaluación estructural y análisis paramétrico en ingeniería civil.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece a la UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, donde se realizaron los ensayos y se utilizó los datos para el modelamiento de la investigación.

REFERENCES

- [1] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [2] A. Hillerborg, M. Modéer, and P. E. Petersson, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements," *Cement and Concrete Research*, vol. 6, no. 6, pp. 773–782, 1976.
- [3] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [4] M. Grassl and M. Jirásek, "Damage-plastic model for concrete failure," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 43, no. 22–23, pp. 7166–7196, 2006.
- [5] Dassault Systèmes, *Abaqus Analysis User's Manual*, Version 2022. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2022.
- [6] B. Alfarah, F. López-Almansa, and S. Oller, "New methodology for concrete damage plasticity models," *Computers & Structures*, vol. 242, 2021.
- [7] T. Yu, J. G. Teng, and Y. L. Wong, "Calibration of concrete damaged plasticity parameters for reinforced concrete structures," *Structures*, vol. 38, pp. 123–138, 2022.
- [8] J. H. Kim and C. S. Lee, "Numerical stability of concrete damaged plasticity models in finite element analysis," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 216, 2023.
- [9] Z. P. Bažant and J. Planas, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1998.
- [10] G. Pijaudier-Cabot and Z. P. Bažant, "Nonlocal damage theory," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 113, no. 10, pp. 1512–1533, 1987.
- [11] Y. Zhang, J. Li, and Z. Wang, "Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete beams using concrete damaged plasticity model," *Engineering Structures*, vol. 226, 2021.
- [12] M. Zhou et al., "Validation of nonlinear finite element models for reinforced concrete beams under flexure," *Structures*, vol. 33, pp. 1234–1248, 2021.
- [13] Y. Zhang, J. Li, and Z. Wang, "Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete beams using CDP model," *Engineering Structures*, vol. 226, 2021.
- [14] D. C. Feng, G. Wu, and Y. Lu, "Numerical modeling strategies for reinforced concrete beams in Abaqus," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, 2022.