

# Influencia Del Ángulo De Dilatancia En Las Curvas Tensión Deformación A Compresión Del Hormigón Con Empleo Del Modelo De Daño Plástico

## Influence of the Dilatance Angle on the Compression Stress Strain Curves of Concrete Using the Plastic Damage Model

### Autores

**Alejandro Socorro Alvarez<sup>1</sup>, Nelson Fundora Sautié<sup>2</sup>, Janet Otmara Martínez Cid<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Profesor de la Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba,, [alejandsocalv@civil.cujae.edu.cu](mailto:alejandsocalv@civil.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup>Ingeniero Civil, Profesor Asistente, Doctor en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba, [nelsonfs@civil.cujae.edu.cu](mailto:nelsonfs@civil.cujae.edu.cu)

<sup>3</sup>Ingeniera Civil, Profesora Titular, Doctora en ciencias técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", Facultad de Ingeniería Civil, Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Marianao La Habana Cuba,, [jcid@civil.cujae.edu.cu](mailto:jcid@civil.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

*El Modelo de Daño Plástico (MDP) considera la degradación del hormigón con el paso del tiempo. El mismo fundamenta su formulación en la mecánica de sólidos, particularmente en la teoría de la plasticidad y en la teoría de daño continuo. El ajuste de este modelo constitutivo requiere de la introducción del ángulo de dilatancia ( $\Psi$ ) sobre el que no existe un consenso con relación al valor a considerar en el proceso de modelación. En el presente trabajo se realiza un estudio sobre la influencia de este parámetro en el comportamiento de la curva de tensión-deformación del hormigón en probetas cilíndricas con el empleo del Modelo de Daño Plástico a partir de un modelo matemático computacional desarrollado en el programa Abaqus, calibrado y validado con los resultados experimentales reportados en la bibliografía consultada. Se emplean valores del ángulo de dilatancia de 15°, 30° y 38°, además se modifica la resistencia a compresión del hormigón considerando valores de 20, 25, 30 y 35 MPa. Se demuestra la influencia del ángulo de dilatancia en las tensiones, deformaciones y gráficos de tensión vs deformación del hormigón.*

**Palabras claves:** Modelo de daño Plástico, Dilatancia, Modelo matemático computacional, Abaqus, Probetas de hormigón

### ABSTRACT

*The Plastic Damage Model (MDP) considers the degradation of concrete over time. He bases his formulation on the mechanics of solids, particularly on the theory of plasticity and on the theory of continuous damage. The adjustment of this constitutive model requires the introduction of the dilatancy angle ( $\Psi$ ) on which there is no consensus regarding the value to be considered in the modeling process. In the present work, a study is carried out on the influence of this parameter on the behavior of the stress-strain curve of concrete in cylindrical specimens with the use of the Plastic Damage Model from a computational mathematical model developed in the Abaqus program, calibrated and validated with the experimental results reported in the consulted bibliography. Dilation angle values of 15°, 30° and 38° are used, in addition the compressive strength of the concrete is modified considering values of 20, 25, 30 and 35 MPa. The influence of the dilatancy angle on the stresses, strains and graphs of stress vs. strain of concrete is demonstrated.*

**Keywords:** Plastic damage model, Dilatance, Computational mathematical model, Abaqus, Concrete specimens

**Nota Editorial:** Recibido: Septiembre 2022 Aceptado: Septiembre 2022

# 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos constitutivos de los materiales son parte esencial del estudio del comportamiento de las estructuras, de ahí la importancia de disponer de aquellos que garanticen una respuesta lo más cercana a la real. Las curvas de comportamiento de los materiales se han obtenido, tradicionalmente, mediante ensayos de laboratorio. El desarrollo actual de las técnicas numéricas y de modelación computacional permiten representar diversas condiciones de estos ensayos sin que se incurran en gastos económicos importantes, además de profundizar en el análisis del comportamiento del material, aspecto que se dificulta en la realización de los ensayos. Este desarrollo de las técnicas numéricas ha permitido establecer modelos constitutivos que consideren la degradación del hormigón con el paso del tiempo como es el Modelo de Daño Plástico (MDP) (Concrete Damaged Plasticity Model) implementado en varios programas de simulación numérica como es el caso de Abaqus.

El Modelo de Daño Plástico (MDP) como modelo descriptivo del comportamiento del hormigón ha sido empleado por numerosos autores [1-5]. Uno de los parámetros necesarios para ajustar el MDP es el ángulo de dilatación. El mismo está asociado al cambio de volumen inelástico que experimenta el sólido y el valor que se debe asignar a dicho parámetro en términos de modelación matemática, según diferentes autores, puede variar en el rango de entre  $15^\circ$  y  $45^\circ$  [1, 4, 6-8].

Los autores Sümer y Aktaş [7] presentan el análisis de la influencia de los parámetros de daño en las curvas de carga vs desplazamiento de elementos de hormigón. Para ellos toman como base las obtenidas en tres ensayos experimentales. En el caso de la dilatación proponen valores entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ . Reportan que las mejores aproximaciones a la curva carga vs desplazamiento tomada como patrón suceden para valores entre  $30^\circ$  y  $37^\circ$ . Otros autores [8] realizan el estudio del comportamiento de conectores a cortante en vigas de hormigón armado. Se analiza el comportamiento por colapso, deslizamiento y arrancamiento a partir de modelos en Abaqus calibrados con ensayos experimentales. En la modelación del hormigón de las vigas emplean el Modelo de Daño Plástico con ángulo de dilatación de  $13^\circ$ , tomando como base los criterios de algunos autores [9, 10].

Altaee, Altayee y Adheem [1] presentan, con el empleo del modelo de daño plástico en Abaqus, la implicación que tiene, entre otros parámetros, la variación del ángulo de dilatación. Se realizaron ensayos a diferentes vigas de hormigón y se variaron los parámetros de la modelación para definir con qué valores se obtenían los resultados más cercanos a los obtenidos en los experimentos. En dicha investigación, entre otros resultados, se concluyó que el ángulo de dilatación tiene una influencia significativa en el modelo de daño de la viga y que valores entre  $45^\circ$  y  $50^\circ$  son los que ofrecen los mejores resultados en términos de desplazamiento-tiempo y fisuras, con relación al experimento realizado.

Silva, Christoforo y Carvalho [6] presentan la modelación en Abaqus de cuatro experimentos realizados a muros de cortante y evalúan los parámetros a definir en dicho programa para lograr resultados cercanos a los experimentos realizados. Entre los parámetros que define se encuentra el ángulo de dilatación sobre el que analiza que el mismo modifica significativamente el comportamiento observado pues al utilizar mayores valores de este parámetro, se observa mayor capacidad de desplazamiento y fuerza. Determina que el valor con el menor error relativo entre experimento y modelo es el de  $46,4^\circ$ .

En el presente trabajo se analizan los resultados obtenidos al evaluar el comportamiento de la curva de tensión deformación del hormigón modificando el ángulo de dilatación. Fue elaborado un modelo con probetas cilíndricas de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro realizado con el programa ABAQUS/CAE Versión 6.14. Para la calibración y validación del mismo fueron tomados como patrón los ensayos a compresión de probetas cilíndricas realizados por Arredondo et al. [11]. El mallado empleado en el software fue de C3D8 y la técnica de mallado empleada fue la de barrido, con una densidad variable con la malla más densa en el perímetro, debido a que los valores más significativos para el estudio se obtuvieron en las zonas externas de las probetas. Se realiza además, un estudio de la influencia del ángulo de dilatación en las tensiones, deformaciones y gráficos de tensión vs deformación del hormigón.

## 2. MODELO NUMÉRICO DE PROBETA DE HORMIGÓN

A continuación, se presenta el proceso de modelación computacional de una probeta de hormigón sometida a compresión. Se describen la geometría, material, mallado, condiciones de borde y la carga aplicada. Se presenta además el proceso de calibración y validación numérica, cuyo objetivo es definir la técnica de mallado, el tipo de elemento y la densidad de malla a emplear. En este proceso fueron empleados como patrón de comparación los resultados experimentales reportados por Arredondo et al. [11].

## Ensayos experimentales empleados como patrón de calibración

Para la realización de los ensayos propuestos por Arredondo et al. [11] fue empleado el procedimiento reportado en la norma ASTM C39 (American Society for Testing and Materials). El objetivo del mismo es obtener los valores experimentales del comportamiento mecánico a compresión del hormigón mediante la aplicación de esfuerzos uniaxiales a probetas cilíndricas con un diámetro de 15cm y una altura de 30cm (Figura 1).



**Figura 1.** Probeta cilíndrica ensayada. Fuente: [11]

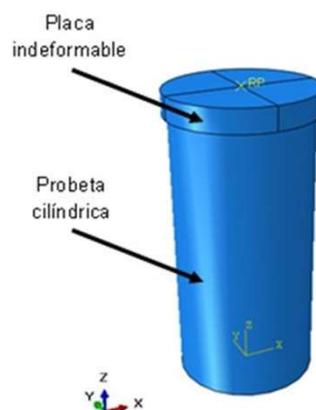
En el trabajo realizado se ensayaron un total de 10 probetas. En la tabla 1 se reportan los resultados de resistencia a compresión de las 5 probetas correspondientes al ensayo ASTM C39. Estos resultados fueron los seleccionados para el proceso de calibración y validación del modelo numérico.

**Tabla 1.** Resultados obtenidos para las probetas de hormigón.

Característica	No. De la probeta				
	1	2	4	5	8
Peso(kg)	12,6	12,6	12,6	12,9	12,8
Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	2,423	2,423	2,392	2,416	2,427
Altura(mm)	299	297,8	300,5	299,8	300,8
Diámetro	148,8	149,1	149,4	150,6	149,4
Área (mm <sup>2</sup> )	17390	17460	17530	17813	17530
Edad (días)	28	28	28	28	28
Carga (kN)	549,3	532,8	603	653,3	631
Resistencia Real (Mpa)	31,59	30,51	34,4	36,68	36

## Geometría del modelo numérico

El modelo está conformado por dos partes, una placa modelada como un elemento discreto rígido (indeformable) y una probeta de hormigón cilíndrica utilizando una circunferencia de diámetro 150 mm y 300 mm como altura (Figura 2). La placa fue incorporada para reproducir con mayor precisión el ensayo experimental.



**Figura 2.** Geometría del modelo Fuente: Elaboración propia.

## Material

Para la modelación del material fue utilizado el modelo de daño plástico mediante el empleo de la formulación propuesta por Alfarah et al. [10]. En la implementación de este modelo constitutivo se define la densidad, el comportamiento elástico y el inelástico tanto en compresión como en tracción del material. Además, deben definirse coeficientes propios del modelo entre los que se destaca por su importancia y amplio rango de valores propuestos en la literatura internacional, el ángulo de dilatación ( $\psi$ ).

En las tablas 2 y 3 se presentan las características del hormigón reportadas por Arredondo et al. [11] en sus ensayos experimentales y los coeficientes del modelo de daño plástico empleados en el modelos numérico respectivamente. Para el modelo fueron adoptados, salvo el ángulo de dilatación, los valores por defecto que brinda el programa.

**Tabla 2.** Propiedades del hormigón modelado

Módulo de Young	25742 MPa
Coefficiente de Poisson	0,18
Esfuerzo máximo	30 MPa
Densidad	2423 kg/cm <sup>3</sup>

**Tabla 3.** Parámetros de daño correspondientes al Modelo de Daño Plástico

$\psi$	$\epsilon$	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	Kc	$\mu$
38	0,1	1,16	0,67	0

Donde:

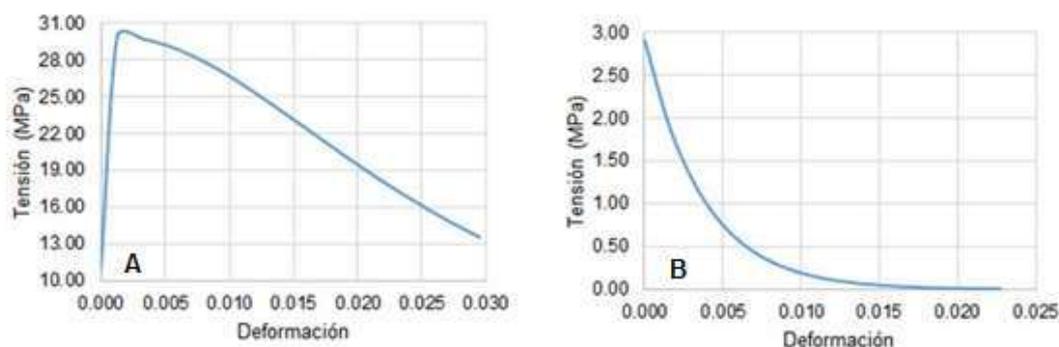
$\epsilon$  : Excentricidad del flujo potencial, este parámetro define la tasa de cambio de la aproximación del flujo potencial a su asíntota [12].

$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ : Parámetro que describe la relación entre el rendimiento fuerza en estado biaxial y uniaxial [12].

Parámetro Kc: Es la relación de la segunda invariante de esfuerzos en el meridiano a tensión contra el meridiano a compresión. Este parámetro adopta valores de 0,5 a 1 [12].

Parámetro de viscosidad ( $\mu$ ): parámetro cuya función es facilitar el proceso de modelos numéricos, que regulan el componente ecuaciones a través del estudio de viscoplasticidad [12].

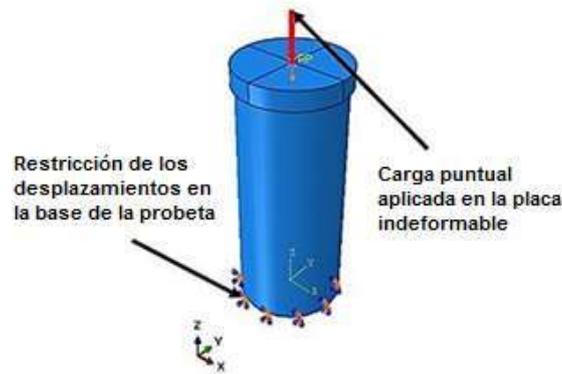
En la figura 3 se muestra las curvas que definen el comportamiento inelástico en compresión y tracción respectivamente según la metodología propuesta por Alfarah et al. [10].



**Figura 3.** Comportamiento inelástico del hormigón. A: Compresión. B: Tracción

## Condiciones de borde y cargas

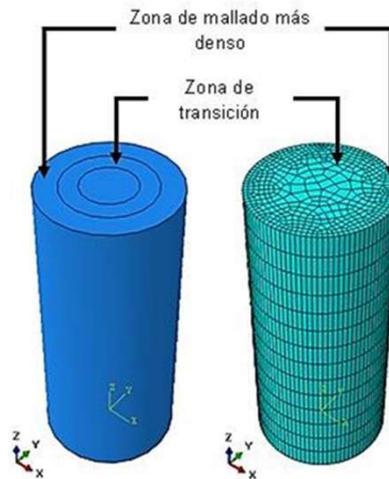
Para la definición de las condiciones de borde se restringen los tres grados de libertad correspondientes a los desplazamientos en la base de la probeta, simulando el ensayo experimental. Fue aplicada una carga puntual sobre la plancha indeformable de 600kN (Figura 4).



**Figura 4.** Condiciones de borde y carga aplicada al modelo. Fuente: Elaboración propia.

### Calibración matemática

La calibración matemática del modelo tiene como objetivo determinar la técnica de mallado a emplear, el tipo de elemento asociado a dicha técnica y la densidad de malla. Como patrón de comparación se emplean los resultados experimentales correspondientes a la probeta 1 obtenidos por Arredondo et al. [11]. En el modelo se genera una malla de densidad variable aumentando la misma hacia los extremos de la probeta, donde suele fallar el espécimen (Figura 5). Para identificar la densidad de malla variable se reporta de forma consecutiva el tamaño del elemento de la zona central, zona de transición y la zona más densa respectivamente.



**Figura 5.** Densidad de malla variable empleada Fuente: Elaboración propia.

### Selección de la técnica de mallado a emplear

Producto de la geometría del modelo pueden aplicarse técnicas de mallado libre, estructurado y barrido, para la selección de la misma se fija una densidad de malla y tipo de elemento correspondiente. Como patrón de comparación fue tomada la carga de rotura de la probeta 1. En la tabla 4 se reportan los resultados obtenidos.

**Tabla 4.** Selección de la técnica de mallado a emplear

Técnica de mallado	Tipo de elemento	Tamaño de los elementos (mm)	Cantidad de elementos	Carga de rotura (kN)		Error relativo (%)
				Ensayo	Modelo	
Estructurado	C3D8	30-20-5	2368	549,30	437,11	20,42
Barrido	C3D8	30-20-5	3042	549,30	517,74	5,74
Libre	C3D4	30-20-5	34110	549,30	444,93	19,00

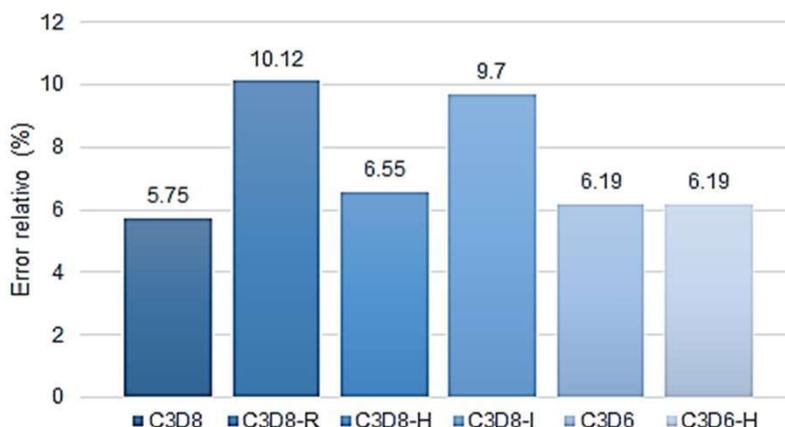
Los resultados muestran que la técnica de mallado que mejor se ajusta a los valores experimentales es la de barrido. Con esta técnica se determinará el tipo de elemento y la densidad de malla a utilizar en el modelo.

### Selección del tipo de elemento y la densidad de malla

Para la selección del tipo de elemento se fija la densidad de malla y se varía el tipo de elemento. En la tabla 5 y la figura 6 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 5.** Selección del tipo de elemento.

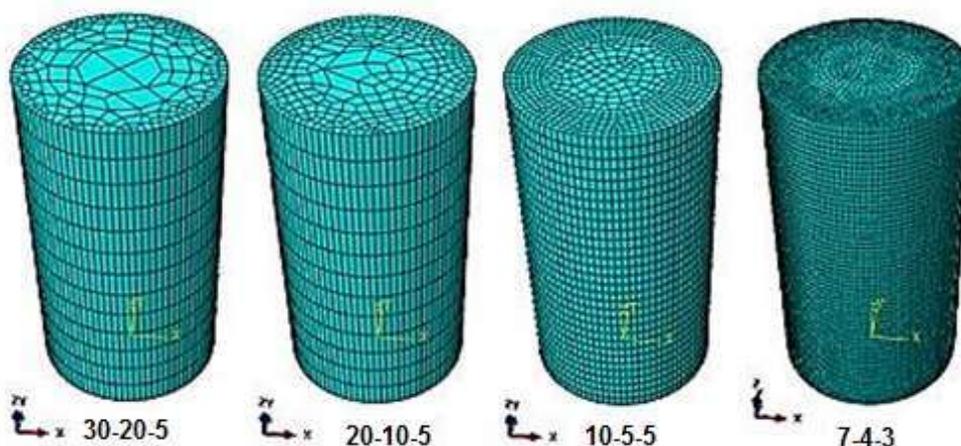
Técnica de mallado	Tipo de elemento	Tamaño de los elementos (mm)	Cantidad de elementos	Carga de rotura (kN)		Error relativo (%)
				Ensayo	Modelo	
Barrido	C3D8	30-20-5	3042	549,30	517,74	5,74
	C3D8-R				493,97	10,12
	C3D8-H				513,30	6,55
	C3D8-I				495,99	9,70
	C3D6		34110		515,27	6,19
	C3D6-H				515,27	6,19



**Figura 6.** Errores relativos de los tipos de elementos seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los tipos de elementos C3D8 y C3D6 reportan errores relativos cercanos al 6% con respecto a los resultados experimentales tomados como patrón. Para la selección de la densidad de malla se selecciona el tipo de elemento C3D8 para el que se obtuvieron los menores errores relativos.

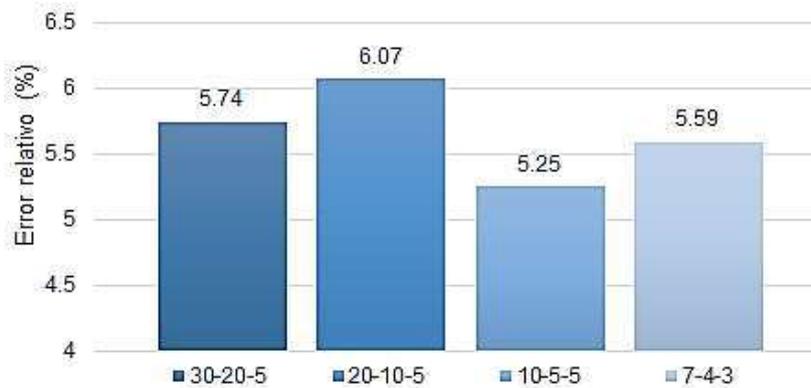
Para el análisis se proponen 4 densidades de malla mostradas en la figura 7. En la tabla 6 y la figura 8 se reportan los resultados de este estudio.



**Figura 7.** Densidades de malla empleadas. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6.** Selección de la densidad de malla.

Técnica de mallado	Tipo de elemento	Tamaño de los elementos (mm)	Cantidad de elementos	Carga de rotura (kN)		Error relativo (%)
				Ensayo (probeta 1)	Modelo	
Barrido	C3D8	30-20-5	3042	549,30	517,74	5,74
		20-10-5	4225		515,95	6,07
		10-5-5	21390		520,47	5,25
		7-4-3	63140		518,57	5,59



**Figura 8.** Errores relativos de las densidades de malla consideradas. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la diferencia entre los errores relativos de las cuatro densidades propuestas no alcanza el 2%. De estas se selecciona la malla 10-5-5, 10 mm en el núcleo central, 5mm en la zona de transición y 5mm en la zona externa. Con esta densidad de malla se lleva a cabo el proceso de validación.

#### Validación del modelo

Para la validación del modelo, con la técnica de mallado por barrido, tipo de elemento C3D6 y densidad de malla 10-5-5 fue seleccionada la probeta 4 de las reportadas en la tabla 1. Al igual que en el proceso de calibración como variable de control se emplea la carga de rotura de la probeta. En las tablas 7 y 8 se reportan las características del hormigón empleado correspondiente a la probeta 4 y los resultados obtenidos respectivamente.

**Tabla 7.** Características del hormigón empleado en la validación.

Técnica de mallado	Tipo de elemento	Tamaño de los elementos (mm)	Carga de rotura (kN)		Error relativo (%)
			Ensayo (probeta 4)	Modelo	
Barrido	C3D8	10-5-5	603,00	590,00	2,16

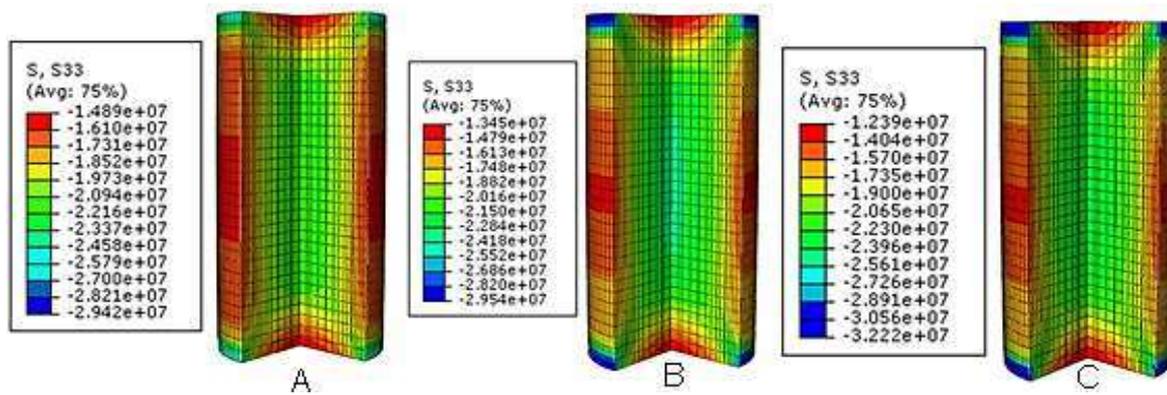
Se aprecia que el error relativo no supera el 3% por lo que se considera el modelo calibrado y validado. Definidas la técnica de mallado, el tipo de elemento y la densidad de malla se propone el estudio de la influencia del ángulo de dilatación en las curvas de comportamiento, así como en los estados tenso-deformationales.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

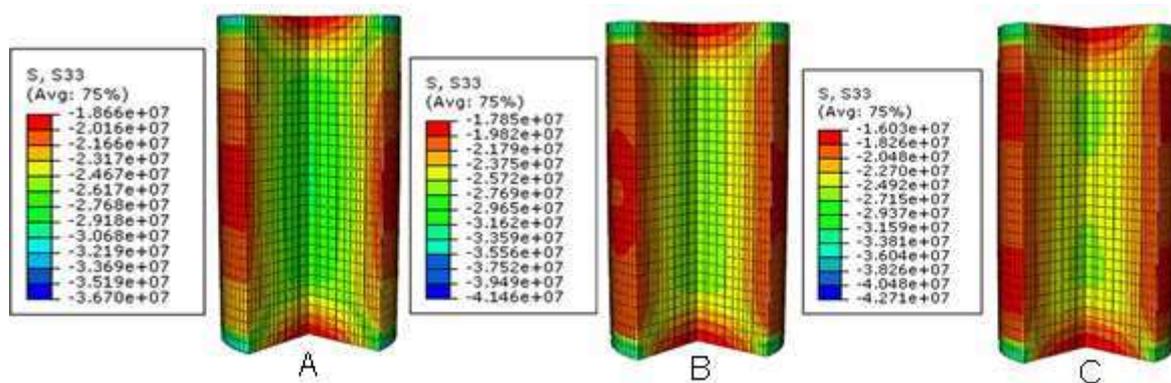
Para el estudio de la influencia del ángulo de dilatación en el comportamiento del hormigón se seleccionaron tres valores representativos 15°, 30° y 38° basando la elección de los mismos en las consideraciones de diferentes autores sobre el ángulo de dilatación y su influencia [2, 3, 7-9]. Como parte del análisis se obtienen las tensiones máximas principales, desplazamientos verticales y las curvas de tensión deformación correspondientes a las resistencias características a compresión uniaxial propuestas de 20, 25, 30 y 35 MPa.

## TENSIONES PRINCIPALES S33

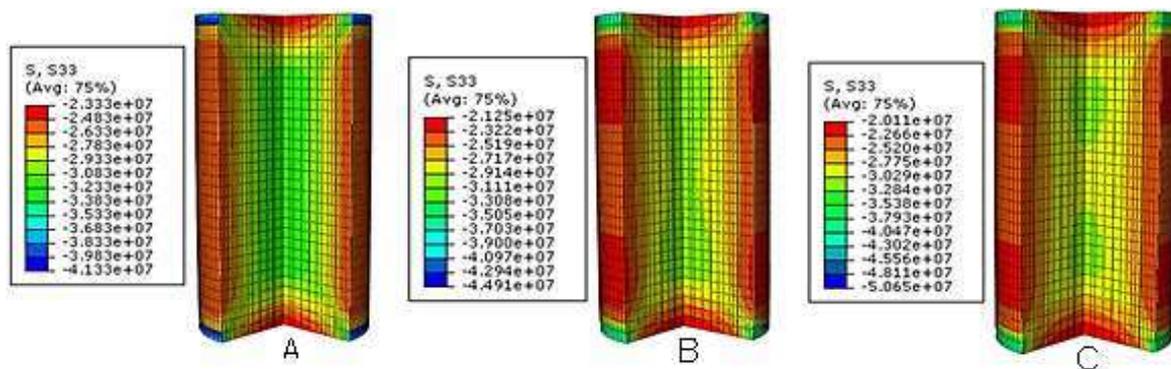
En las figuras 9 a 12 se presentan las tensiones principales verticales (S33) correspondientes a los tres ángulos de dilatación para las cuatro resistencias características a compresión uniaxial propuestas de 20, 25, 30 y 35 MPa.



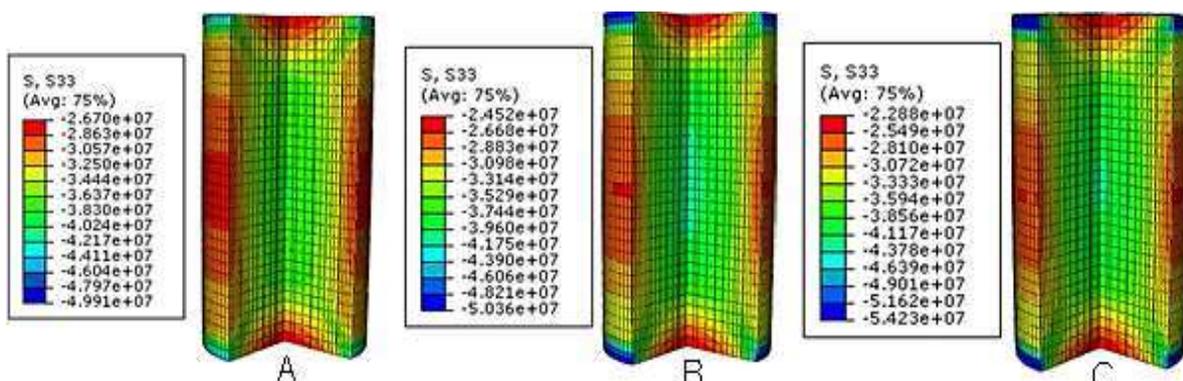
**Figura 9.** Distribución de tensiones (S33) en la probeta de 20 MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38°. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 10.** Distribución de tensiones (S33) en la probeta de 25 MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38°. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11.** Distribución de tensiones (S33) en la probeta de 30 MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38°. Fuente: Elaboración propia.



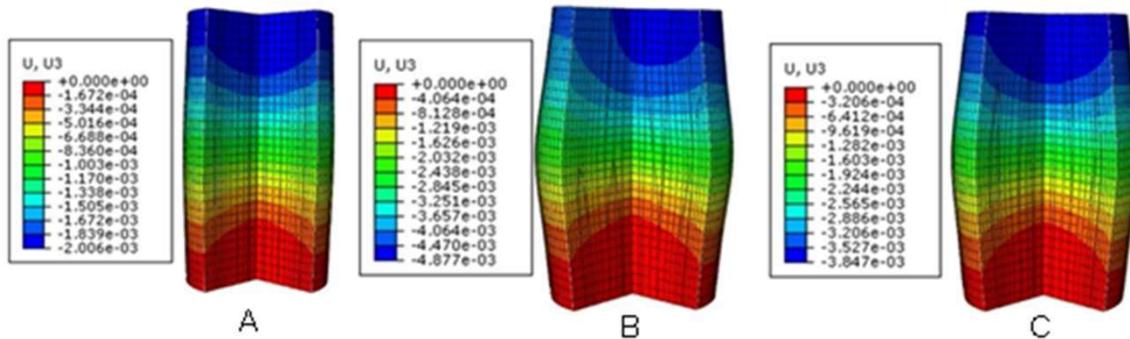
**Figura 12.** Distribución de tensiones (S33) en la probeta de 35 MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38°. Fuente: Elaboración propia.

En las corridas de los modelos se aprecia el aumento del ángulo de dilatación modifica la distribución de tensiones principales verticales en los modelos de 25, 30 y 35MPa. En el núcleo de la probeta se producen incrementos de tensiones de 27 a 31MPa, de 32 a 35MPa y de 38 a 43MPa para las probetas de 25, 30 y 35 MPa respectivamente. En el caso de 20MPa, en todos los casos las tensiones en el núcleo se encuentran alrededor de los 23MPa.

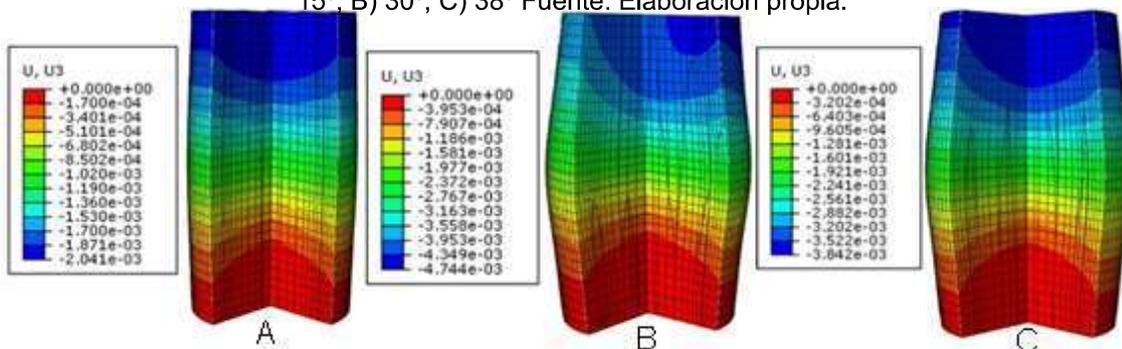
En las caras externas de las probetas sucede lo contrario, en todos los casos el aumento del ángulo de dilatación provoca una disminución de las tensiones y modifica la distribución de estas en el perímetro de las probetas.

### DESPLAZAMIENTOS

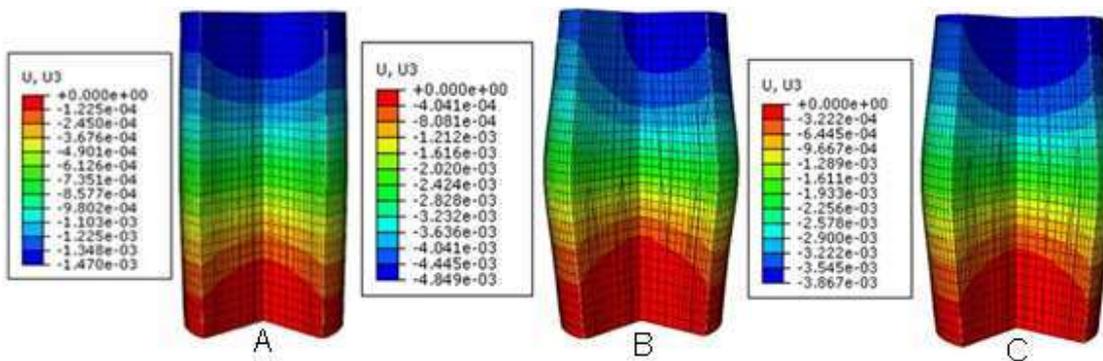
En las figuras 13 a 16 se presentan los desplazamientos verticales en metros (U3) obtenidos en la modelación



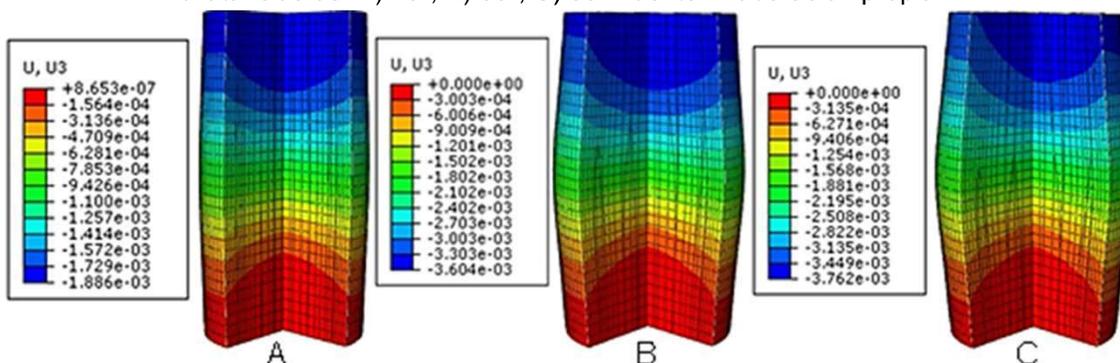
**Figura 13.** Desplazamientos (U3) correspondientes a la probeta de 20MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38° Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14.** Desplazamientos (U3) correspondientes a la probeta de 25MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38° Fuente: Elaboración propia.



**Figura 15.** Desplazamientos (U3) correspondientes a la probeta de 30MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38° Fuente: Elaboración propia.

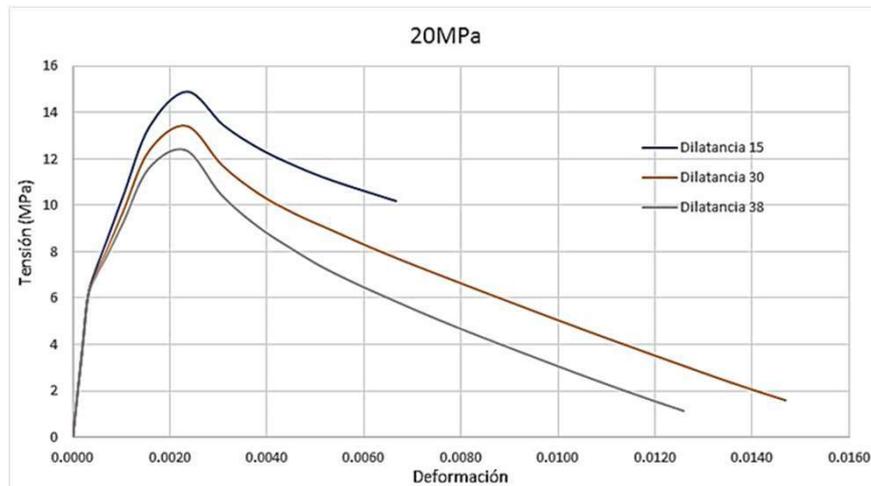


**Figura 16.** Desplazamientos (U3) correspondientes a la probeta de 35MPa para las dilataciones de: A) 15°, B) 30°, C) 38° Fuente: Elaboración propia.

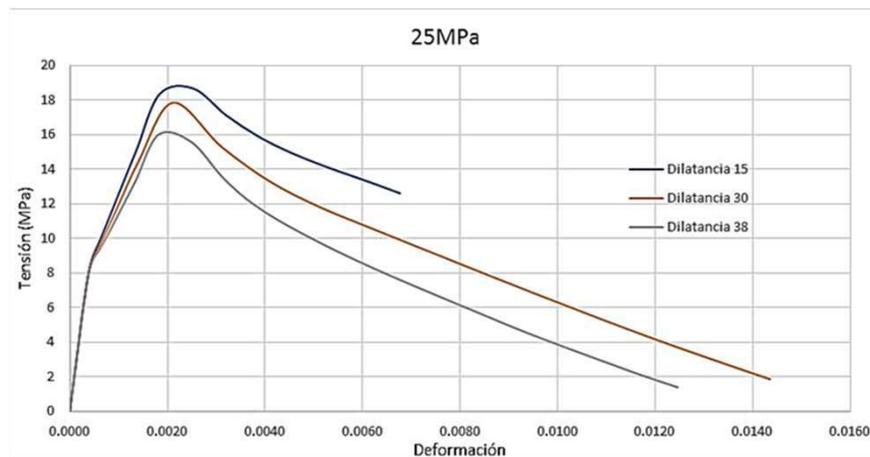
Las distribuciones de desplazamientos en las probetas correspondientes a las resistencias a compresión estudiadas para los ángulos de dilatación propuestos presentan junto con el incremento del ángulo de dilatación un aumento significativo del acortamiento de las probetas. Tomando como referencia la dilatación de 15°, los valores reportados para 30° y 38° se duplican. Para un mismo valor de dilatación se aprecia que con el incremento de la resistencia a compresión el acortamiento se reduce. El mayor acortamiento se produce para la dilatación de 30° en las cuatro resistencias a compresión consideradas.

## CURVAS DE TENSIÓN VS DEFORMACIÓN

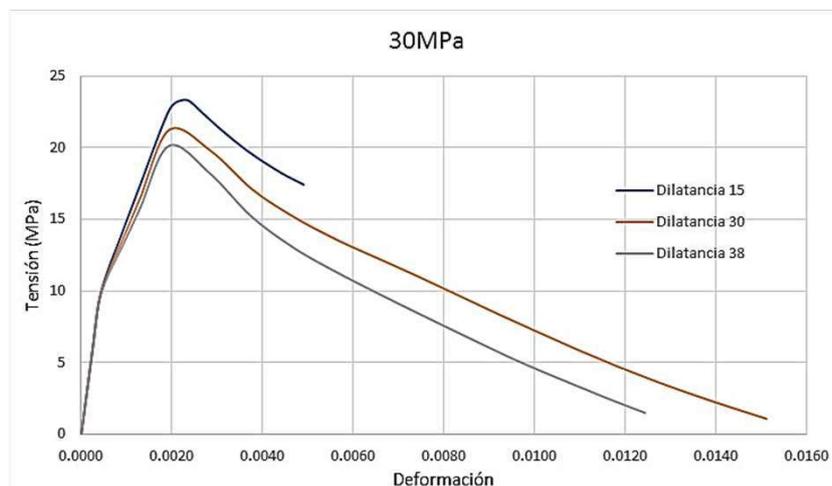
En las figuras 17 a 20 se presentan, para las resistencias características a compresión uniaxial del hormigón propuestas, las curvas de tensión vs deformación obtenidas para los tres ángulos de dilatación estudiados.



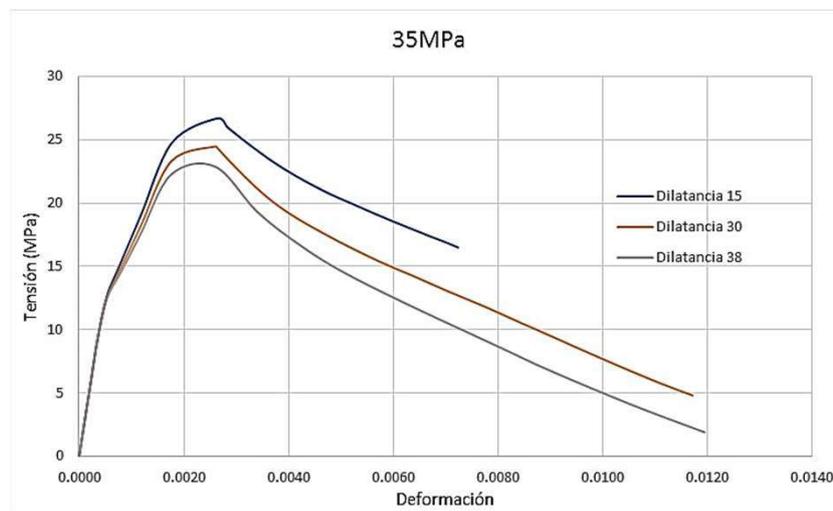
**Figura 17.** Curvas de tensión vs deformación para el hormigón de 20 MPa correspondientes a los ángulos de dilatación estudiados. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 18.** Curvas de tensión vs deformación para el hormigón de 25 MPa correspondientes a los ángulos de dilatación estudiados. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 19.** Curvas de tensión vs deformación para el hormigón de 30 MPa correspondientes a los ángulos de dilatación estudiados. Fuente: Elaboración propia.



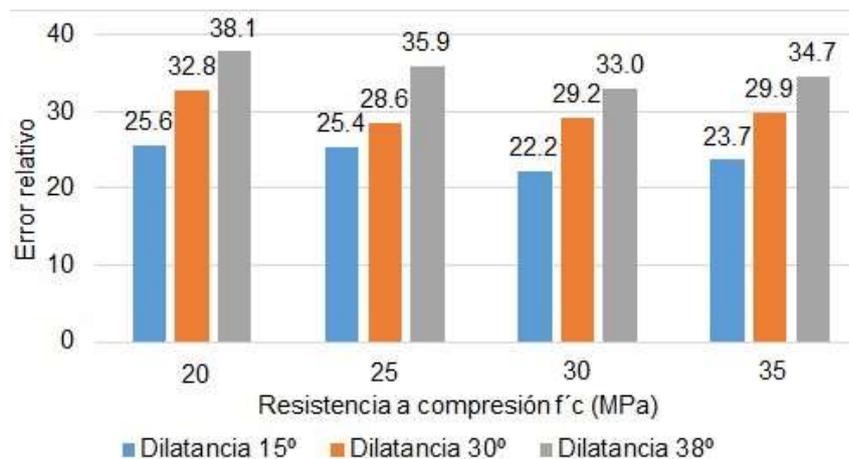
**Figura 20.** Curvas de tensión vs deformación para el hormigón de 35 MPa correspondientes a los ángulos de dilatación estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos presentados muestran que las tensiones máximas no alcanzan los valores de resistencia a compresión correspondientes. Esto se debe a que el modelo de daño plástico incorpora curvas de comportamiento con el daño del material implícito. Los valores de tensiones reportados son obtenidos en un nodo ubicado en el centro de la cara superior de la probeta. En todos los casos los valores máximos se alcanzan para un ángulo de dilatación de 15°.

También se aprecia que el aumento del ángulo de dilatación provoca la disminución de la tensión máxima para un mismo valor de resistencia a compresión. En la tabla 9 se presentan los valores máximos de resistencias características a compresión uniaxial del hormigón ( $f'_c$ ) alcanzadas para cada uno de los casos analizados, en la figura 21 se reportan los errores relativos producto de la consideración del daño en el material.

**Tabla 9.** Valores de resistencia a compresión ( $f'_c$ ) alcanzados

$f'_c$ (MPa)	Ángulo de dilatación (°)		
	15	30	38
20	14,9	13,5	12,4
25	18,6	17,8	16,0
30	23,3	21,2	20,1
35	26,7	24,5	22,9



**Figura 21.** Errores relativos producto de la consideración del modelo de daño plástico

Se aprecia en el gráfico que la consideración del modelo de daño plástico implica reducciones de entre 25% y 38% con relación a la resistencia a compresión del hormigón sin daño en función del valor de ángulo de dilatación que se emplee. Para una misma resistencia a compresión, el incremento del ángulo de dilatación provoca una reducción en la resistencia a compresión que puede superar el 12%.

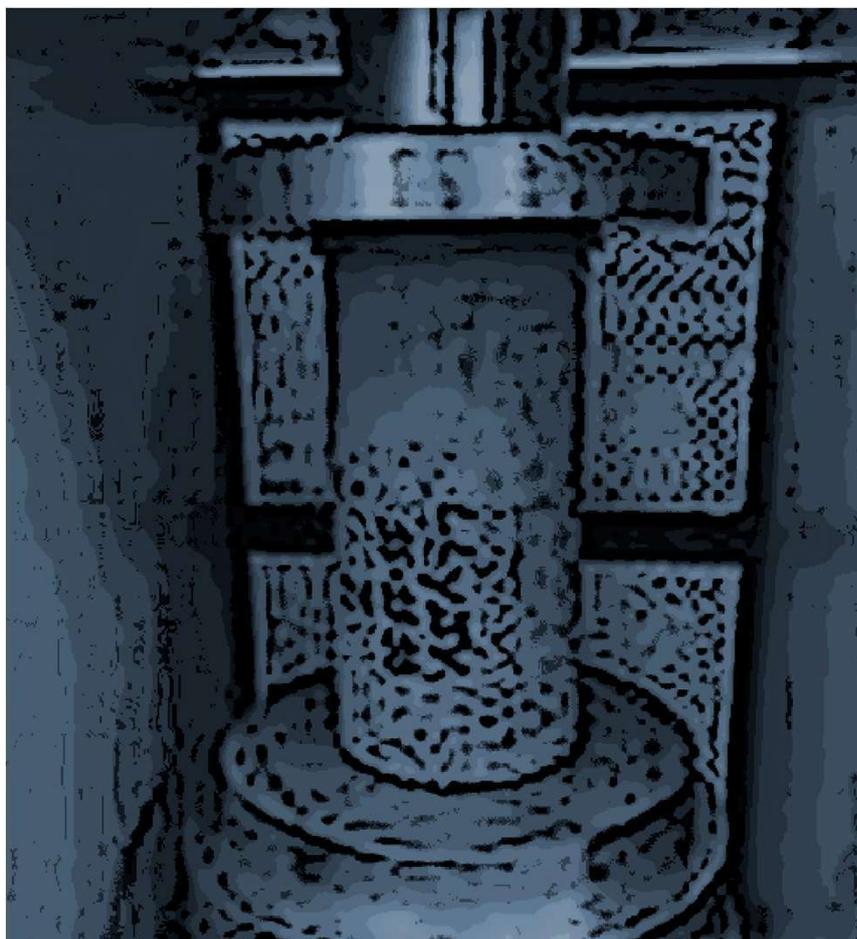
En el caso de las deformaciones que experimenta la probeta, el aumento del ángulo de dilatación conlleva al incremento de las deformaciones, reportándose los mayores valores para 30°. En el caso de la probeta con resistencia de 35MPa, las deformaciones máximas se alcanzan para 38° de dilatación.

Para resistencias de 20, 25 y 30MPa las tensiones máximas alcanzadas corresponden a deformaciones por el orden de 0,002, deformación para la máxima tensión en compresión de hormigón sin daño. Para el caso de los 35MPa este valor de tensión máxima se alcanza para valores de deformaciones por el orden de 0,003.

Lo anterior demuestra la modificación que sufre la curva de comportamiento del material cuando se introducen los parámetros de daño. Esto puede constituir un acercamiento en el estudio del comportamiento de elementos de hormigón con niveles considerables de deterioro.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que para resistencias a compresión de 25, 30 y 35MPa se producen incrementos de tensiones en el núcleo de la probeta con el aumento del ángulo de dilatación. Para 20MPa los valores de tensiones se mantienen estables. Tomando como referencia la dilatación de 15°, los valores de acortamiento de las probetas reportados para 30° y 38° se duplican. Los mayores acortamientos se producen para 30°. El daño experimentado por el hormigón de las probetas tanto en compresión como en tracción, se incrementa en la medida que aumenta el ángulo de dilatación. Se aprecia en el gráfico que la consideración del modelo de daño plástico implica reducciones de entre 25% y 38% con relación a la resistencia a compresión del hormigón sin daño en función del valor de ángulo de dilatación que se emplee. El aumento del ángulo de dilatación conlleva al incremento de las deformaciones que experimentan las probetas.



1. M. J. Altaee;, S. S. Altayee;, and a. A. H. Adheem, "Employment of damage plasticity constitutive model for concrete members subjected to high strain-rate," p. 15, 2020.
2. J. O. M. Cid;, N. F. Sautié;, L. R. Alejo;, and a. C. A. R. Morfa, "Computational Modeling of Beam-Column Joint with Wedge Effect," p. 12, 2020.
3. P. Kmiecik; and M. Kamiński, "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration," Archives of civil and mechanical engineering, vol. Vol. XI, p. 14, 2011.
4. B.-b. Li;, H.-b. Xiong;, J.-f. Jiang;, and a. Y. Zhan, "Damage plasticity model for passively confined concrete," MATEC Web of Conferences, 2019.
5. S.V.Chaudhari; and M.A.Chakrabarti, "Modeling of concrete for nonlinear analysis Using Finite Element Code ABAQUS," International Journal of Computer Applications, vol. 44, p. 5, 2012.
6. L. M. e. Silva;, A. L. Christoforo;, and R. C. Carvalho, "Calibration of Concrete Damaged Plasticity Model parameters for shear walls," Revista Materia, vol. 26, p. 26, 2021.
7. Y. Sümer; and M. Aktaş, "Defining parameters for concrete damage plasticity model," Challenge journal of structural mechanics, p. 7, 2015.
8. L. M. Bezerra;, W. C. S. Barbosa;, J. Bonilla;, and O. R. O. Cavalcante, "Truss-type shear connector for composite steel-concrete beams," Construction and Building Materials, vol. 167, p. 11, 2018.
9. S. Oller, Fractura mecánica. Un enfoque global, Primera ed.: CIMNE Barcelona, 2001.
10. B. Alfarah, F. López-Almansa, and S. Oller, "New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures," Engineering Structures, pp. 70-86, 2017.
11. L. A. L. Arredondo;, J. V. Tapia;, J. F. Meriño;, and W. R. Díaz, "Determinación del comportamiento mecánico del Hormigón fc'30 mediante métodos experimentales y numéricos (MEF)," EISSN 2542-3401 Universidad, Ciencia y Tecnología Vol. 23, N° 92 Junio 2019 pp. (pp. 64-73), 2019.
12. S. Dassault, "Abaqus 2016: Analysis User's Guide, Volume III: Materials. Dassault Systemes.," 2015.