

LA INDENTACIÓN CONFINADA COMO ENSAYO TRIAXIAL VISCOPLÁSTICO: DESARROLLO Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO YIELDCOMPRESS®

A.T. Fonseca^(a), S. Batista^(b), J. Silva^(b), R. Silva^(b), M. Alves^(b) y Custom Technologies, Ltd^(c)

(a) DEMAC, Universidad de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

(b) MCS, Zona Industrial de Oiã, Apartado 163, 3840-909 Oiã (OBR), Portugal

(c) Custom Technologies, Lda, Beco da Agra n.º 12, Verdemilho, 3810-539 Aveiro, Portugal

RESUMEN

Los métodos reológicos convencionales utilizados para caracterizar las composiciones cerámicas plásticas, en particular la reometría oscilatoria y extensional, no reproducen adecuadamente los estados de tensión triaxiales generados durante las operaciones de conformado industrial. Para superar esta limitación, se desarrolló el método YIELDcompress®.

El método propuesto permite determinar directamente los parámetros viscoplásticos en condiciones representativas de los procesos de conformado industrial, lo que garantiza que las propiedades medidas sean directamente aplicables a las composiciones cerámicas utilizadas en el prensado RAM, el conformado con rodillos, la extrusión y el *robocasting* (moldeo robotizado). La indentación confinada puede interpretarse como un ensayo triaxial viscoplástico capaz de proporcionar parámetros reológicos intrínsecos relevantes para las operaciones de conformado industrial.

En el dispositivo YIELDcompress®, la composición cerámica se confina dentro de un anillo metálico rígido y se somete a una indentación controlada, reproduciendo así estados de tensión representativos de los generados durante los procesos de conformado industriales.

La interpretación de los resultados experimentales se basa en un modelo constitutivo viscoplástico que combina el modelo de ley de potencias de Herschel-Bulkley con el criterio de fluencia de Drucker-Prager, lo que permite determinar parámetros intrínsecos del material, tales como la *tensión de fluencia confinada* ($\tau_{yconf.}$), la *consistencia reológica* (K), el *índice de comportamiento reológico* (n) y una *longitud característica* (L_c).

Tanto la composición de porcelana formulada para el robocasting como la composición de gres utilizada para el prensado RAM mostraron tres regímenes de deformación distintos: un régimen elástico inicial, un régimen transitorio asociado al inicio del flujo viscoplástico cuando la tensión aparente alcanza la tensión de fluencia confinada, y un régimen de estado estacionario caracterizado por una respuesta mecánica estabilizada.

Ambas composiciones muestran, en las condiciones ensayadas, una respuesta casi independiente de la velocidad, es decir, $n \approx 0$. Esto significa que el comportamiento viene determinado principalmente por el límite elástico confinado y por la resistencia estructural de la red de partículas, más que por una contribución viscosa dependiente de la velocidad de indentación.

El método propuesto constituye una herramienta sencilla y de relevancia industrial para la formulación, optimización y control de calidad de composiciones cerámicas destinadas a la extrusión, el prensado RAM, el conformado con rodillos y el robocasting cerámico.

1. INTRODUCCIÓN

En el conformado plástico de composiciones cerámicas – incluidos el prensado RAM, la compactación con rodillos, la extrusión y el robocasting [1,2] – el comportamiento reológico puede describirse, en una primera aproximación, mediante modelos viscoplásticos como el de Bingham (un modelo idealizado de material viscoplástico con viscosidad plástica constante) o el de Herschel-Bulkley [3], en los que la tensión de fluencia τ_y define el umbral necesario para el inicio del flujo plástico, seguido de una contribución viscosa que depende de la velocidad de deformación.

En este contexto, es esencial garantizar una tensión de fluencia suficientemente alta para asegurar la estabilidad dimensional tras el conformado y evitar la deformación bajo el propio peso del material. Sin embargo, un aumento de τ_y conlleva necesariamente una mayor tensión de extrusión necesaria para iniciar el flujo, lo que dificulta el proceso de conformado.

Además, una vez superada la tensión de fluencia, el flujo viene determinado por la contribución viscosa del material, descrita habitualmente por el modelo de Herschel-Bulkley [3] mediante una relación de ley de potencias de la forma $\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$, donde K y n influyen considerablemente en la resistencia al flujo. La reducción de la humedad, aunque eficaz para aumentar τ_y , conlleva al mismo tiempo un aumento de K , lo que aumenta aún más la resistencia al flujo viscoso.

Esta cuestión es, fundamentalmente, la clásica relación de compromiso que se plantea en los sistemas viscoplásticos utilizados en el moldeado de composiciones plásticas: una composición debe ser lo suficientemente “resistente” como para evitar el colapso tras el moldeado, pero lo suficientemente “blanda” como para fluir durante el mismo (prensado, extrusión o robocasting). La clave está en que ajustar únicamente el contenido de humedad no afecta a un único parámetro de forma aislada. Por el contrario, se intenta desacoplar dos

respuestas reológicas que normalmente están acopladas, lo que genera dificultades de procesado y puede provocar fallos.

Este acoplamiento entre la tensión de fluencia y el comportamiento viscoso pone de manifiesto las limitaciones de los enfoques empíricos basados exclusivamente en el control de la humedad y justifica el uso de una descripción reológica viscoplástica formal para la optimización del procesado de composiciones plásticas, especialmente en la fabricación mediante robocasting [4]. Por lo tanto, es necesario identificar qué parámetros de procesado son los factores dominantes que rigen, o determinan de forma exclusiva, cada parámetro reológico, es decir τ_y , la contribución viscosa tras el umbral de fluencia $(\tau - \tau_y)/\dot{\gamma} = K\dot{\gamma}^{n-1}$ y L_c .

Sin embargo, en todos los procesos de conformado plástico, las composiciones cerámicas no están sometidas únicamente a tensiones de cizalla puras, como podrían sugerir las expresiones anteriores. En estos procesos, las composiciones experimentan estados de tensión triaxiales complejos, debido a la restricción que impide la deformación en una o más direcciones. Como resultado, ya no tiene sentido referirse a una tensión de fluencia de cizalla pura τ_y , sino más bien a una tensión de fluencia confinada τ_{yconf} . [5-7].

Los métodos reológicos convencionales, entre los que se incluyen la reometría rotacional y oscilatoria, proporcionan parámetros determinados en condiciones de cizalla predominantemente simples. Sin embargo, estas mediciones no reproducen directamente los estados de tensión triaxiales confinados característicos de las operaciones industriales de conformado de piezas cerámicas. Esta limitación, tanto en términos de representatividad como de solidez operativa, motivó el desarrollo del método YIELDcompress®.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La indentación confinada como ensayo triaxial viscoplástico

Los procesos industriales de conformado de composiciones cerámicas plásticas tienen lugar bajo estados de tensión complejos en los que coexisten la compresión, la cizalla y el confinamiento. En tales condiciones, la caracterización reológica basada exclusivamente en ensayos de cizalla simple resulta insuficiente para describir la respuesta mecánica del material durante el procesado.

En el equipo YIELDcompress® la composición cerámica se confina dentro de un anillo metálico rígido y se somete a indentación a una velocidad constante mediante un punzón cilíndrico de extremo plano. Esta configuración genera bajo el punzón un estado de tensión predominantemente triaxial, acompañado de un flujo viscoso localizado en la región periférica adyacente al punzón.

Por consiguiente, el ensayo de indentación confinada puede interpretarse como un ensayo triaxial viscoplástico implícito, capaz de reproducir condiciones mecánicas similares a las que se dan en los procesos industriales de conformado de composiciones cerámicas plásticas [8-10].

La magnitud experimental que se mide directamente es la fuerza F_t transmitida a la célula de carga instalada debajo de la base del sistema. Si se define el área de la sección transversal del punzón como A_p , la tensión aparente media σ_{ap} es:

$$\sigma_{ap}(h) = \frac{F_t(h)}{A_p} \quad (1)$$

donde h representa la profundidad de la indentación.

2.2. Equilibrio mecánico y estado de tensiones

Durante el ensayo, la velocidad de indentación es constante, por lo que los efectos inerciales son insignificantes. En estas condiciones, el sistema evoluciona en condiciones cuasiestáticas.

La fuerza aplicada al punzón se distribuye entre la fuerza transmitida a la base y las fuerzas de fricción que se desarrollan a lo largo de la pared lateral del anillo. El equilibrio estático global puede representarse mediante:

$$F_p = F_t + F_w^a \quad (2)$$

donde F_p es la fuerza aplicada al punzón y F_w^a es la fuerza de fricción resultante ejercida por la pared del anillo sobre la composición.

Debajo del punzón plano se desarrolla un campo de tensiones aproximadamente axisimétrico, caracterizado por una tensión normal media p [Pa] [6,7,8]:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \quad (3)$$

o de forma equivalente,

$$p = -\frac{1}{3}I_1 \quad (4)$$

Donde:

- I_1 es el primer invariante del tensor de tensiones [Pa];
- σ_r , σ_θ , y σ_z son las componentes de tensión normal radial, circunferencial y axial, respectivamente [Pa].

La magnitud de esta presión aumenta con la profundidad de indentación, lo que refuerza progresivamente los contactos entre las partículas y modifica la condición de fluencia del material.

2.3. Fluencia dependiente del confinamiento

Las composiciones cerámicas plásticas son sistemas saturados de partículas cuya resistencia mecánica se debe simultáneamente a la cohesión estructural de la red sólida y a la fricción que se desarrolla entre las partículas comprimidas.

En estas condiciones, la tensión necesaria para iniciar el flujo depende no solo de las propiedades intrínsecas de la composición, sino también del estado de confinamiento.

Para incorporar este efecto, se adopta el criterio de Drucker-Prager [13], ya que resulta adecuado para materiales cohesivos-friccionantes sometidos a estados de tensión triaxiales [9,14].

La tensión de fluencia confinada se define mediante:

$$\tau_{yconf}(I_1) = \tau_y + 3\alpha p \quad (5)$$

donde:

- τ_{yconf} representa la tensión de fluencia confinada [Pa];
- τ_y representa la tensión de fluencia intrínseca [Pa];
- p es la presión hidrostática media [Pa];
- α expresa la sensibilidad de la fluencia al confinamiento [adimensional].

Esta formulación establece una distinción fundamental entre la tensión de fluencia medida en condiciones de cizalla simple y la tensión de fluencia movilizada efectivamente durante los procesos de conformado industrial.

2.4. Régimen posterior al límite elástico

Una vez superado el límite elástico, se supone que el material sigue una ley viscoplástica del tipo de Herschel-Bulkley:

$$\tau_{eq} = \tau_{y,conf}(p) + K\dot{\gamma}^n \quad (6)$$

donde:

- τ_{eq} es la tensión desviatoria equivalente;
- $\tau_{y,conf}(p)$ es la tensión de fluencia confinada dependiente de la prensa;
- K es el índice de consistencia [$Pa \cdot s^n$];
- n es el índice de comportamiento de flujo [adimensional];
- $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla equivalente [s^{-1}].

En el contexto de la indentación confinada, la velocidad de deformación característica se estima como:

$$\dot{\gamma}_{eq} \approx \frac{v}{L_c} \quad (7)$$

donde:

- v es la velocidad de indentación [mm/s];
- L_c es una longitud característica asociada a la extensión de la zona de deformación activa [mm].

Este parámetro desempeña un papel fundamental en la interpretación física del ensayo.

2.5. Activación geométrica del volumen movilizado

Las observaciones experimentales muestran que la influencia mecánica del indentador no se propaga instantáneamente por todo el volumen del material. A medida que aumenta la profundidad de indentación, un volumen cada vez mayor de material participa en la transmisión de tensiones y en la deformación. Para describir este fenómeno, se introduce la siguiente función de activación geométrica:

$$\phi(h) = 1 - e^{-h/L_c} \quad (8)$$

Esta función cumple simultáneamente las siguientes condiciones: $\phi(0) = 0$, $\phi(h \approx 0) = h/L_c$ para valores muy pequeños de h (desarrollo en serie de Maclaurin en torno a $h=0$), $\phi(L_c) \approx 0,632$ cuando $h = L_c$ y $\phi(\infty) = 1$. Representa la fracción del volumen alterado afectado por el punzón que ya ha sido movilizado mecánicamente por el indentador.

El parámetro L_c corresponde a la profundidad de indentación a la que ya se ha movilizado aproximadamente el 63% del volumen alterado final.

Desde un punto de vista físico, L_c puede interpretarse como una longitud característica que rige la propagación de la influencia mecánica del indentador dentro del material. Representa la dimensión característica de la zona viscoplástica activa situada debajo del indentador.

2.6. Ecuación constitutiva operativa

Se adopta un enfoque de activación fenomenológico para describir la movilización progresiva del material situado bajo el penetrador. Al combinar la tensión de fluencia dependiente del confinamiento, la ley viscoplástica de Herschel-Bulkley [3] y la función de activación geométrica, se obtiene la siguiente expresión operativa:

$$\sigma_{ap}(h, v) = \left[\tau_{yconf} + K \left(\frac{v}{L_c} \right)^n \right] (1 - e^{-h/L_c}) \quad (9)$$

Esta ecuación relaciona directamente las magnitudes medidas experimentalmente – la profundidad de indentación y la fuerza transmitida – con los parámetros constitutivos del material.

La formulación supone que la tensión aparente resulta de la activación progresiva de un volumen creciente de material a medida que avanza la indentación. Por lo tanto, la función de activación se introduce como una representación fenomenológica del desarrollo gradual de la zona de deformación viscoplástica situada debajo del indentador.

La respuesta experimental se interpreta como el efecto combinado de dos contribuciones físicamente distintas:

- Una contribución constitutiva asociada a la resistencia cohesiva y de fricción y a la resistencia viscosa del material;
- Una contribución geométrica asociada a la movilización progresiva del volumen de deformación activo.

La separación explícita de estos dos efectos constituye la base conceptual del método propuesto y permite identificar, a partir de ensayos de indentación confinada, los parámetros viscoplásticos relevantes para los procesos de conformado industrial.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del ensayo

Una masa plástica de arcilla se confina dentro de un anillo metálico rígido con un diámetro interno de 80 mm y una altura de 30 mm. Un punzón cilíndrico de acero blando pulido con un extremo plano, cuyo diámetro oscila entre 5 y 10 mm y cuya longitud es de 15 mm, penetra en el material a una velocidad constante, v (mm/s). Esta velocidad puede variar entre ensayos, tomando valores comprendidos entre 0,50 y 2,50 mm/s. La Figura 1 ilustra esquemáticamente los componentes principales del dispositivo y las fuerzas externas que intervienen durante el ensayo. La esquina superior derecha de la figura muestra la relación entre las coordenadas cartesianas y cilíndricas.

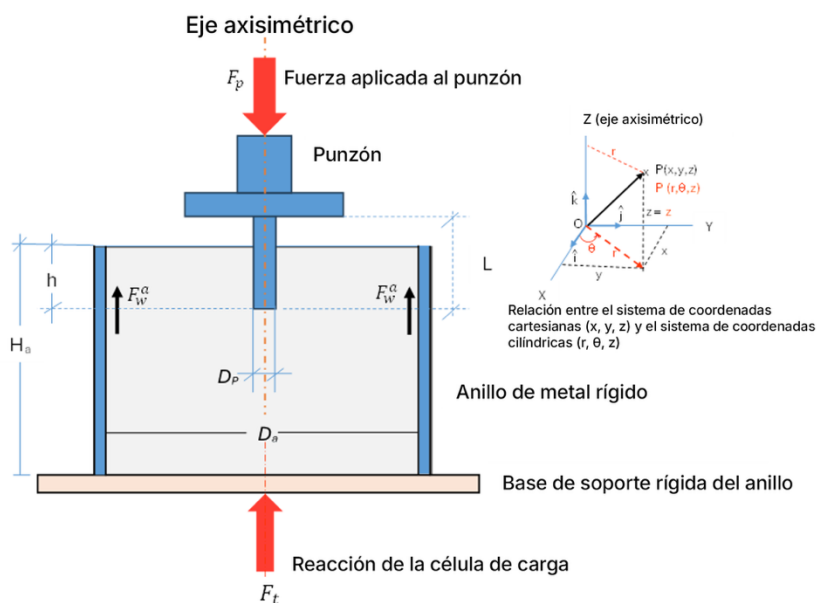


Figura 1. Diagrama esquemático del aparato de indentación confinada en el que se muestra la geometría de la configuración de ensayo y las componentes verticales de las fuerzas aplicadas externamente y de fricción que actúan sobre el material cerámico confinado. Símbolos: H_a – altura del anillo; h – profundidad de indentación; D_a – diámetro interno del anillo; D_p – diámetro del punzón; L_p – longitud del punzón; F_p – fuerza aplicada al punzón; F_t – fuerza transmitida a la célula de carga; F_w^a – fuerza resultante de la fricción entre el material y la pared.

Las muestras utilizadas en el ensayo se obtienen directamente de bloques extruidos al vacío. Se corta un disco del bloque con las caras perpendiculares al eje del mismo y con un espesor ligeramente superior a la altura del anillo. Se coloca una de las caras del disco sobre una base rígida y se sitúa el anillo metálico sobre la cara opuesta, alineando los centros del anillo y del disco. Se aplica una presión uniforme alrededor del perímetro del anillo hasta que este alcance la base de apoyo del disco. El material sobrante (cara superior) se retira con un cortador de alambre, lo que da como resultado una superficie plana sin tensión de compactación.

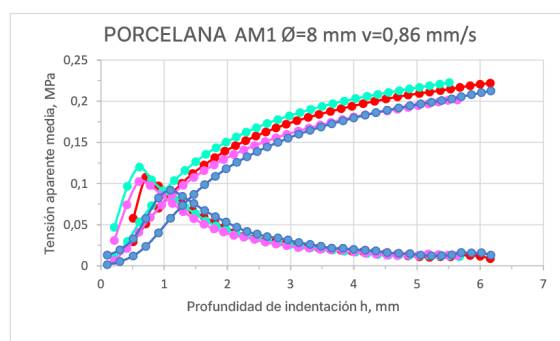
Antes del ensayo, se marcan cuatro puntos de indentación en la superficie de las probetas, situados en los extremos de dos diámetros perpendiculares de un círculo concéntrico de 20 mm de radio. El punto 1 corresponde a la marca dejada por la cinta transportadora a la salida de la extrusora. Los puntos restantes se identifican secuencialmente en el sentido de las agujas del reloj. Cada probeta se somete a ensayo a una velocidad de indentación específica, y las

propiedades reológicas correspondientes se determinan a partir de los valores medios medidos para dicha probeta.

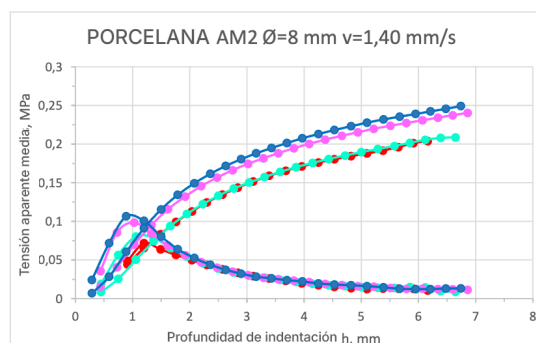
En cada ensayo, el sistema informático registra la profundidad de indentación y la carga transmitida en función del tiempo, la tensión aparente media ($\sigma_{ap} = F_t/A_p$) en función de la profundidad de indentación h , y la primera derivada de σ_{ap} con respecto a h . El valor máximo de esta derivada indica el final del régimen elástico y el inicio del flujo plástico.

4. RESULTADOS

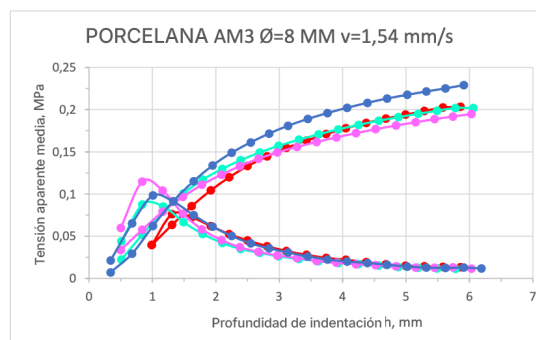
Los resultados de los ensayos de indentación confinada de las composiciones de porcelana y de gres se muestran en las figuras y tablas siguientes.



Ensayo	h_e mm	σ_e MPa	$A(v)$ MPa	$A(v)$ correct. MPa	$0,63A(v)$ MPa	h_c mm	$0,63 \cdot A(v)$ correct. MPa	L_c mm	v mm/s
T1	0,71	0,05108	0,22204	0,17096	0,13989	1,96	0,10770	1,25	0,86
T2	0,61	0,05332	0,22436	0,17104	0,14135	1,98	0,10776	1,37	0,85
T3	0,60	0,04086	0,20161	0,16075	0,12701	1,80	0,10127	1,20	0,85
T4	1,10	0,05767	0,21245	0,15478	0,13384	1,81	0,09751	0,71	0,87
Media	0,66	0,05220	0,21725	0,16586	0,13686	1,89	0,10449	1,23	0,86
SD (s)	0,24	0,00713	0,01037	0,00802	0,00654	0,10	0,00505	0,29	0,01
Mean-3s	-0,05	0,03082	0,18612	0,14179	0,11726	1,60	0,08933	0,35	0,83
Mean+3s	1,37	0,07358	0,24837	0,18992	0,15647	2,17	0,11965	2,10	0,88



Ensayo	h_e mm	σ_e MPa	$A(v)$ MPa	$A(v)$ correct. MPa	$0,63A(v)$ MPa	h_c mm	$0,63 \cdot A(v)$ correct. MPa	L_c mm	v mm/s
T1	1,2	0,06551	0,2039	0,13839	0,12846	2,40	0,08719	1,20	1,38
T2	1,1	0,05049	0,20862	0,15813	0,13143	2,37	0,09962	1,27	1,41
T3	1,0	0,06987	0,24038	0,17051	0,15144	2,35	0,10742	1,35	1,41
T4	0,9	0,06064	0,24938	0,18874	0,15711	2,24	0,11891	1,34	1,41
Media	1,1	0,06308	0,22450	0,16432	0,14144	2,36	0,10352	1,31	1,41
SD (s)	0,13	0,00833	0,02268	0,02117	0,01429	0,07	0,01334	0,07	0,02
Mean-3s	0,66	0,03809	0,15646	0,10080	0,09857	2,15	0,06351	1,10	1,37
Mean+3s	1,44	0,08806	0,29254	0,22784	0,18430	2,57	0,14354	1,52	1,46



Ensayo	h_e mm	σ_e MPa	$A(v)$ MPa	$A(v)$ correct. MPa	$0,63A(v)$ MPa	h_c mm	$0,63 \cdot A(v)$ correct. MPa	L_c mm	v mm/s
T1	1,31	0,06364	0,20351	0,13987	0,12821	2,43	0,08812	1,12	1,52
T2	0,84	0,05196	0,20201	0,15005	0,12727	2,00	0,09453	1,16	1,54
T3	0,8	0,06844	0,23595	0,16751	0,14865	1,93	0,10553	1,09	1,54
T4	1,0	0,0622	0,22953	0,16733	0,14460	2,1	0,10542	1,09	1,54
Media	0,9	0,06292	0,21652	0,15869	0,13641	2,05	0,09997	1,13	1,54
SD (s)	0,22	0,00693	0,01752	0,01362	0,01104	0,22	0,00858	0,03	0,01
Mean-3s	0,26	0,04212	0,16397	0,11784	0,10330	1,39	0,07424	1,03	1,51
Mean+3s	1,59	0,08372	0,26907	0,19954	0,16951	2,71	0,12571	1,22	1,57

Figura 2. Respuesta de la composición de porcelana sometida al ensayo de indentación confinada: curvas superiores σ_{ap} ; curvas inferiores $d\sigma_{ap}/dh$. Código de color: ensayo 1 (rojo), ensayo 2 (azul claro), ensayo 3 (morado claro) y ensayo 4 (azul oscuro). Columnas de la tabla: h_e y s_e son la profundidad de indentación y la tensión aparente media, respectivamente, al final del periodo elástico; $A(v)$ es la tensión asintótica y $A(v)_{correct} = A(v) - s_e$; h_c es la longitud característica antes de la corrección y L_c es la longitud característica.



Figura 3. Respuesta de la composición de gres sometida al ensayo de indentación confinada: curvas superiores σ_{ap} ; curvas inferiores $d\sigma_{ap}/dh$. La numeración y orientación de los puntos son las mismas empleadas con las probetas de porcelana que se muestran en la Figura 2.

Utilizando los valores medios de las tablas de las Figuras 2 y 3, en las que se indican h_e , σ_e , $A(v)_{correct.}$, L_c y v para las composiciones de porcelana y gres, y suponiendo que la tensión de fluencia confinada $\tau_{yconf.}$ es la tensión aparente media al final del régimen elástico o al inicio del flujo plástico, se tiene que:

$$\tau_{yconf.} \approx \sigma_e \quad (10)$$

Para la contribución posterior al límite elástico, se utilizó la siguiente expresión:

$$A(v)_{correct} = K \left(\frac{v}{L_c} \right)^n \quad (11)$$

o considerando la definición (7):

$$A(v)_{\text{correct}} = K(\dot{\gamma}_{eq})^n \quad (12)$$

A partir de los gráficos y tablas de la Figura 1, las Tablas 1 y 2 condensan los datos reológicos para las composiciones de porcelana y de gres:

Muestra	v mm/s	L _c mm	$\dot{\gamma}_{eq}$ s ⁻¹	t MPa	A(v) _{correct.} MPa
AM1	0,86	1,23	0,699	0,052	0,166
AM2	1,41	1,31	1,076	0,063	0,164
AM3	1,54	1,13	1,363	0,063	0,159

Tabla 1. Datos reológicos de la composición de porcelana para robocasting

y los valores principales:

$$\tau_{y,conf.} = 0,059 \pm 0,006 \text{ MPa}$$

$$L_c = 1,22 \pm 0,09 \text{ mm}$$

Al ajustar $A(v)_{\text{correct}} = K(v/L_c)^n$, se obtienen los siguientes valores:

$$K = 0,163 \text{ MPa}^n$$

$$n = -0,061$$

$$n \approx 0$$

$$K \approx 0,163 \text{ MPa}$$

Los valores ajustados de n eran cercanos a cero y se encontraban dentro de la incertidumbre experimental. Por lo tanto, puede considerarse que ambas composiciones son independientes de la velocidad en el rango de velocidades de indentación estudiado ($n \approx 0$).

Así pues, la composición de porcelana muestra una respuesta prácticamente independiente de la velocidad dentro del rango de velocidades de indentación analizado.

Muestra	v mm/s	L _c mm	$\dot{\gamma}_{eq}$ s ⁻¹	t MPa	A(v) _{correct.} MPa
AM1	0,95	1,23	0,699	0,052	0,166
AM2	1,14	1,31	1,076	0,063	0,164
AM3	1,37	1,13	1,363	0,063	0,159

Tabla 2. Datos reológicos de la composición de gres para el prensado RAM

y los valores principales:

$$\tau_{y,conf.} = 0,168 \pm 0,025 \text{ MPa}$$

$$L_c = 1,40 \pm 0,08 \text{ mm}$$

Al ajustar $A(v)_{correct} = K(v/L_c)^n$, se obtienen los siguientes valores:

$$K = 0,426 [\text{MPa} \cdot \text{s}^n]$$

$$n = -0,110$$

Dentro del rango analizado, la composición de gres presenta un comportamiento que se rige predominantemente por el flujo confinado y que solo es ligeramente sensible a la velocidad de indentación. Las conclusiones extraídas para la composición de porcelana en lo que respecta a n son igualmente aplicables a la composición de gres.

Por lo tanto, la interpretación física recomendada es:

$$n \approx 0$$

$$K \approx 0,436 \text{ MPa}$$

De este modo, los parámetros reológicos finales recomendados para las composiciones estudiadas son los que figuran en la siguiente Tabla 3:

Parámetro	Unidad	Porcelana robocasting	Gres prensado RAM
$t_{y \text{ conf.}}$	$\text{MPa} \cdot \text{s}^{-n}$	$0,059 \pm 0,006$	$0,168 \pm 0,025$
K	MPa	$\approx 0,163$	$\approx 0,436$
n	adimensi.	≈ 0	≈ 0
L_c	mm	$1,22 \pm 0,09$	$1,40 \pm 0,08$

Tabla 3. Comparativa reológica de las composiciones de porcelana y de gres

La composición de gres presenta una tensión de fluencia confinada aproximadamente 2,8 veces superior a la de la composición de porcelana. También presenta una consistencia tras el límite de fluencia aproximadamente 2,7 veces mayor.

El ajuste directo proporcionó valores ligeramente negativos de n . Sin embargo, dado que la variación de la contribución tras el límite de fluencia con la velocidad de indentación es comparable a la dispersión experimental, estos valores no tienen un significado físico claro. Por lo tanto, se consideró que ambas composiciones eran independientes de la velocidad dentro del rango investigado ($n \approx 0$).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados distinguen claramente las dos composiciones cerámicas. La composición de porcelana, formulada para el robocasting, presenta valores bajos de tensión de fluencia confinada y de consistencia, lo que concuerda con la necesidad de que el material fluya a través de las boquillas de deposición bajo tensiones relativamente moderadas. Dicho comportamiento concuerda, en general, con los requisitos descritos para los sistemas de fabricación aditiva basados en la extrusión [14]. Al mismo tiempo, la presencia de una tensión de fluencia medible indica que el material conserva cierta capacidad para mantener su forma tras la deposición, lo cual es esencial para la construcción capa a capa.

La composición de gres presenta una resistencia confinada mucho mayor. Su $\tau_{y,conf.}$ es casi tres veces superior al de la composición de porcelana, y lo mismo ocurre con la contribución tras el límite elástico K . Este comportamiento es coherente con una composición destinada al prensado RAM, en el que se requiere una mayor resistencia a la deformación, una mayor estabilidad dimensional y una mayor capacidad para soportar estados de tensión compresiva y confinada durante el llenado del molde y la compactación.

El parámetro L_C también diferencia a las dos composiciones. La composición de porcelana presenta un valor medio de aproximadamente 1,22 mm, mientras que la de gres presenta un valor de aproximadamente 1,40 mm. Esta diferencia sugiere que, en la composición de gres, la zona de deformación activa movilizada por el punzón es ligeramente más extensa, lo que puede estar asociado a una red de partículas más resistente y a una transmisión de tensiones más eficiente. En la composición de porcelana, la menor resistencia mecánica y la mayor fluidez dan lugar a una movilización más localizada.

El análisis del índice de comportamiento del flujo n requiere precaución. El ajuste matemático directo proporciona valores ligeramente negativos para ambas composiciones, pero estos no deben presentarse como propiedades reológicas intrínsecas. El rango de velocidades de indentación es reducido, y los valores de $A(v)_{correct.}$ varían solo ligeramente, siendo la dispersión experimental comparable a la variación con la velocidad de indentación. Por lo tanto, la conclusión científicamente más sólida es que ambas composiciones muestran, en las condiciones ensayadas, una respuesta casi independiente de la velocidad, es decir:

$$n \approx 0$$

Esto significa que el comportamiento viene determinado principalmente por la fluencia confinada y por la resistencia estructural de la red de partículas, más que por una contribución viscosa dependiente de la velocidad de indentación.

Desde un punto de vista tecnológico, se trata de una conclusión importante: el método YIELDcompress® permite separar la resistencia inicial al flujo, la resistencia posterior al límite elástico y la extensión espacial de la zona deformada. Esta separación es especialmente relevante porque los requisitos de procesamiento son diferentes. La composición de porcelana debe fluir fácilmente durante el robocasting, mientras que la composición de gres debe resistir la deformación durante el prensado RAM. La capacidad de identificar de forma independiente τ_y , K y L_C a partir de un único ensayo de indentación confinada respalda la interpretación propuesta del ensayo como un método implícito de caracterización triaxial viscoplástica.

6. CONCLUSIONES

La composición de porcelana presenta una baja tensión de fluencia confinada, una baja consistencia y una longitud característica ligeramente inferior a la de la composición de gres. Estos resultados concuerdan con su mayor idoneidad para procesos que requieren un flujo controlado, como el robocasting.

La composición de gres presenta valores significativamente más altos de $\tau_{y,conf.}$ y de K , lo que refleja una estructura particulada más resistente y una mayor capacidad para soportar la deformación bajo confinamiento. Este comportamiento resulta adecuado para el prensado RAM, donde la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica durante el conformado son prioritarias.

En ambas composiciones, el índice de comportamiento de flujo debe considerarse aproximadamente nulo dentro del rango de velocidades de indentación ensayadas. Por lo tanto, la dependencia de la tensión respecto a la velocidad de indentación es débil, y la respuesta viene determinada principalmente por el límite elástico bajo confinamiento y por la estructura interna de la composición.

La comparación entre las dos formulaciones confirma que el ensayo de indentación confinada permite distinguir entre composiciones cerámicas destinadas a diferentes procesos de conformado, proporcionando parámetros directamente relacionados con su procesabilidad industrial: $\tau_{yconf.}$, K , n y L_C .

Los resultados respaldan la interpretación de la indentación confinada como un ensayo triaxial viscoplástico implícito. Por lo tanto, la metodología YIELDcompress® ofrece un método práctico para caracterizar composiciones cerámicas plásticas sometidas a estados de tensión confinados representativos de las operaciones de conformado industriales, al tiempo que identifica los parámetros asociados al límite elástico confinado, la resistencia tras el límite elástico y la movilización de la zona de deformación.

7. REFERENCIAS

- [1] J.A. Lewis, Colloidal processing of ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.* 83 (2000) 2341–2359.
- [2] J.S. Reed, *Principles of ceramic processing*, Journal of the European Ceramic Society, 17 (1997) 541–548.
- [3] W.H. Herschel, R. Bulkley, Consistency of rubber–benzene solutions, *Kolloid-Zeitschrift* 39 (1926) 291–300.
- [4] J.A. Lewis, Direct ink writing of 3D functional materials, *Advanced Functional Materials* 16 (2006) 2193–2204.
- [5] H.A. Barnes, The yield stress – a review or ‘ $\pi\alpha\nu\tau\alpha$ $\rho\epsilon\iota$ ’ – everything flows?, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 81 (1999) 133–178.
- [6] P. Coussot, Yield stress fluid flows: A review of experimental data, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 211 (2014) 31–49.
- [7] A. M'Barki, L. Bocquet, A. Stevenson, Linking rheology and microstructure in confined and concentrated suspensions, *Soft Matter* 13 (2017) 2454–2465.

- [8] R. Buscall, L.R. White, The consolidation of concentrated suspensions, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 83 (1987) 873–891.
- [9] A.N. Schofield, C.P. Wroth, *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London, 1968.
- [10] Needleman, A., Tvergaard, V., Van der Giessen, E. Indentation of elastically soft and plastically compressible solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2015.
- [11] R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, Oxford, 1950.
- [12] S.P. Timoshenko S.P., Goodier J.N., *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [13] D.C. Drucker, W. Prager, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Q. Appl. Math.* 10 (1952) 157–165.
- [14] D.M. Wood, *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.