XXV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
Santander, 10-13 junio 2025
UC Universidad de Cantabria
IFToMM

Análisis de la Influencia del Paralelismo en la Fiabilidad del Ensayo Brasileño con Discos de Caras Horizontales

R. A. Gutiérrez-Moizant[1], D. J. Guerrero-Miguel[2], M. Ramírez-Berasategui[1], M.I. Álvarez-Fernández[3], C. González-Nicieza[3]

[1]*Departamento de Ingeniería Mecánica, Advanced Vehicle Dynamics and Mechatronic Systems (VEDYMEC), Universidad Carlos III de Madrid, 28911 Leganés, España, ragutier@ing.uc3m.es, mrami@ing.uc3m.es*

[2] *Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Comportamiento Dinámico del Terreno (DINROCK), Universidad de Oviedo, 33204 Gijón, España, querrerodiego@uniovi.es*

[3] *Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Comportamiento Dinámico del Terreno (DINROCK), Universidad de Oviedo, 33600 Mieres, España, , inma@uniovi.es, cgonzalez@uniovi.es*

Uno de los principales inconvenientes del ensayo brasileño convencional para determinar la resistencia a tracción indirecta de materiales frágiles es la influencia de la longitud del contacto en el estado de tensiones generado tanto en el centro de la muestra como en el punto inicial de la fractura. Para abordar esta fuente de incertidumbre, se ha propuesto el ensayo brasileño de caras horizontales, en el que se fija previamente la longitud total de contacto, con el objetivo de determinar la resistencia a tracción indirecta de rocas y hormigón. De acuerdo con sus creadores, las caras del disco garantizan que la distribución de la carga en la zona de contacto con la prensa es uniforme y con esto se minimiza el riesgo de fallo prematuro del disco. En este artículo se analiza la influencia del paralelismo de las caras horizontales en el éxito del ensayo brasileño mediante simulaciones con elementos finitos y ensayos experimentales. Para determinar la zona de inicio del fallo, se ha utilizado la técnica de correlación digital de imágenes. Además, se ha comprobado la distribución de la carga entre la máquina de ensayos universal y las caras planas del disco mediante el uso de láminas de presión. Estas láminas encapsulan un líquido coloreado que tiñe la superficie de la lámina cuando se aplica sobre ella una determinada carga, sin que el líquido escape de la lámina. Las zonas con una presión análoga tendrán una intensidad de teñido similar, mientras que las zonas con distinta intensidad indican que la presión en ellas es diferente. Los resultados del estudio sugieren que la validez del ensayo brasileño con discos de caras horizontales está fuertemente influenciada por la tolerancia de paralelismo. Las tolerancias requeridas para el éxito del ensayo son muy difíciles de conseguir en la práctica. Se demuestra que incluso utilizando platos autoalineables el fallo del disco no se origina en el centro, por tanto, su validez no está garantizada.

1. Introducción

El ensayo brasileño se utiliza ampliamente para determinar la resistencia a la tracción indirecta de la mayoría de los materiales frágiles, como rocas [1-3] u hormigón [4-5]. El ensayo estándar se realiza aplicando progresivamente una carga con una mordaza sobre la parte superior de un disco de material hasta la rotura. Sin embargo, la eficacia de este método aún no está totalmente confirmada, ya que se ha observado que la resistencia a la tracción obtenida a través del ensayo indirecto difiere del método de tracción directa [6-8]. Además, numerosas investigaciones han concluido que la falla del disco en el ensayo brasileño suele ser cercana al área de contacto, debido a una alta concentración de tensiones [9-14]. En consecuencia, el criterio de rotura de Griffith [15] no se cumple y los resultados no son válidos. Para reducir la concentración de tensiones y la falla prematura del disco, Wang [14] propusieron el ensayo brasileño con discos de caras horizontales. El método consiste en mecanizar dos extremos planos paralelos al disco que, por lo tanto, se cargan utilizando placas planas o discos de compresión (Figura.1), donde P denota la carga total aplicada, R es el radio de la muestra considerándola completamente circular y 2α es el ángulo de contacto.

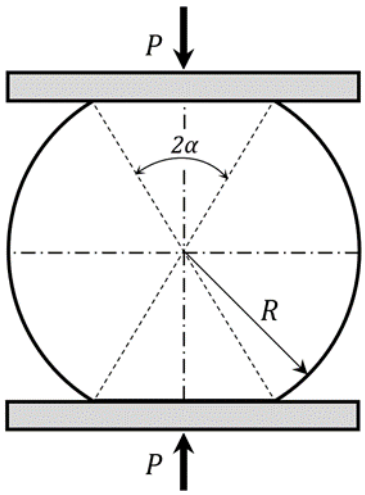


Figura 1: Ensayo brasileño de caras horizontales.

Sin embargo, hay que mencionar que la distribución real de las tensiones generadas durante la ejecución de esta prueba todavía es un tema en continuo debate. Diferentes autores [16-17] han estudiado el efecto del ángulo de contacto (2α) en la ubicación del inicio de la grieta, determinando que el ángulo de carga óptimo es $2\alpha = 30°$. Además, la planitud y el paralelismo de las superficies en contacto con el disco de compresión, han sido referidas como importantes para la eficacia y validez del ensayo [14].

El objetivo principal del presente estudio es verificar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a tracción indirecta mediante la implementación de la nueva geometría propuesta por Wang [14]. En esta primera fase, se ha estudiado la influencia del paralelismo de las caras horizontales del espécimen, para lo que se han realizado análisis numéricos mediante el método de elementos finitos (MEF) y ensayos experimentales. La validez del ensayo se ha evaluado en función de la localización del punto de inicio de la grieta, que debe iniciarse en el centro del disco. La distribución de tensiones equivalentes de Griffith, derivada de las simulaciones, ha permitido determinar cuantitativamente la tolerancia máxima admisible en la falta de paralelismo que asegura la fiabilidad del ensayo.

Los ensayos experimentales se realizaron en una máquina de ensayo universal de clase II, debidamente calibrada y equipada con platos de compresión autoalineables, conforme a las normas aplicables [1-2]. Además, se colocaron películas de presión entre las caras horizontales del espécimen y los platos de compresión para verificar la uniformidad del contacto inducida por el sistema autoalineables. Esta metodología experimental ha permitido corroborar lo observado numéricamente y, por tanto, contribuir a la validación integral del procedimiento propuesto, lo cual es importante para el avance de la investigación.

2. Influencia de la tolerancia de paralelismo entre las caras horizontales

Con el fin de analizar el impacto del paralelismo en la validez del ensayo, se ha empleado una estrategia metodológica combinada que incluye simulaciones numéricas mediante MEF y ensayos experimentales. Para poder determinar la zona potencial de inicio de la fisura en las muestras analizadas, se ha utilizado la técnica de correlación digital de imágenes (DIC, por sus siglas en inglés). Este enfoque ha permitido evaluar cómo pequeñas desviaciones geométricas en las caras horizontales de los discos afectan al campo de tensiones y al punto de inicio de la fractura.

Las simulaciones MEF han sido una herramienta ampliamente utilizada en el estudio del ensayo brasileño, debido a su capacidad para reproducir condiciones de carga controladas y realizar análisis paramétricos sistemáticos [9], [11], [14].

Por otro lado, las técnicas DIC han demostrado ser especialmente útiles para la caracterización experimental de materiales frágiles sometidos a esfuerzos indirectos, y se han aplicado previamente en el contexto del ensayo brasileño aplanado [18– 21]. Basadas en algoritmos de correlación de patrones, estas técnicas permiten rastrear el desplazamiento superficial del espécimen a partir de imágenes tomadas durante el ensayo. Para ello, es necesario el uso de una cámara digital, es decir visión monocular, suficiente para capturar el inicio de la grieta, así como las asimetrías en el campo de deformaciones inducidas por la falta de paralelismo de las caras de contacto. Diferentes estudios han demostrado que la técnica DIC, permite analizar simultáneamente la iniciación de grietas [19], [22], las propiedades mecánicas [23] y elásticas durante los ensayos de caracterización de materiales [24].

2.1. Modelo Numérico

Para analizar numéricamente la influencia del paralelismo entre las caras horizontales del disco en el ensayo brasileño, se desarrollaron diversos modelos tridimensionales utilizando el software de elementos finitos Abaqus. Con el fin de representar de forma realista las condiciones experimentales, se implementó un contacto superficie a superficie entre los platos de compresión y las superficies horizontales del disco.

La rigidez de los platos, fabricados en acero, se garantizó mediante la asignación de un módulo de Young siete veces superior al del disco, permitiendo considerar su deformación como despreciable durante la simulación. Además, se estableció una tolerancia de contacto nula (0 mm) al inicio del análisis, a fin de evitar el cierre excesivo de nodos que pudiera comprometer la convergencia del modelo.

El mallado se realizó con elementos sólidos de tipo brick lineales de 8 nodos (C3D8). Se utilizó un tamaño de elemento de 1 mm para el disco y de 3 mm para los platos de compresión, siguiendo las recomendaciones y prácticas reportadas en la literatura [6], [11]. Esta discretización garantiza un adecuado equilibrio entre precisión y coste computacional.

En todos los modelos se consideró un coeficiente de fricción representativo de μ = 0.5 en la interfaz de contacto entre el disco y los platos de compresión, de acuerdo con lo reportado por Pallett et al. [25]. Para simular condiciones de deformación plana (plane strain), se restringieron los desplazamientos longitudinales en las caras exteriores del disco. La carga se aplicó como una presión uniforme de 15 MPa sobre la cara libre del plato de compresión superior, mientras que el inferior se mantuvo completamente restringido en sus grados de libertad, reproduciendo así las condiciones de contorno del ensayo real.

El comportamiento del material se modeló como elástico e isotrópico, y se adoptaron propiedades mecánicas representativas de la caliza. Las propiedades geométricas y mecánicas empleadas en los modelos numéricos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas y geométricas del modelo MEF.

	Diámetro (mm)	**Espesor (mm)**	**Coeficiente de Poisson ($\mu\epsilon/\mu\epsilon$)**	**Módulo de Young (GPa)**
Disco	53.60	27.00	0.31	30
Plato de compresión	30.00	30.00	0.33	210

En una primera fase, se verifico el mapa de tensiones del modelo de elementos finitos con las caras perfectamente paralelas entre ellas y también con los platos de compresión.

$$3\sigma_\theta + \sigma_r < 0 \tag{1}$$

Siendo σ_θ y σ_r la tensión tangencial y radial, respectivamente. Debido a la simetría del ensayo, el diámetro vertical es una dirección principal; por lo tanto, no se inducen tensiones cortantes a lo largo de él. Por lo tanto, existe una relación directa entre las coordenadas cartesianas y polares a lo largo del diámetro vertical, donde $\sigma_x = \sigma_\theta$ y $\sigma_y = \sigma_r$. En consecuencia, la tensión equivalente de Griffith se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_G = -\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{8(\sigma_x + \sigma_y)} \tag{2}$$

La distribución de la tensión equivalente de Griffith para el caso del disco con caras horizontales paralelas se muestra en la Figura 2. En esta fase del estudio, no se centra en la magnitud de las tensiones, sino en su patrón de distribución en el disco. Se observa que las tensiones máximas se localizan en la zona central de la cara vertical del disco, mientras que no se detectan concentraciones significativas en los vértices de las caras horizontales. Esta distribución indica que, en condiciones de paralelismo ideal, la grieta podría iniciarse en el centro del disco, lo que sugiere una alta probabilidad de que la fractura se desarrolle en la ubicación esperada y el ensayo sea válido.

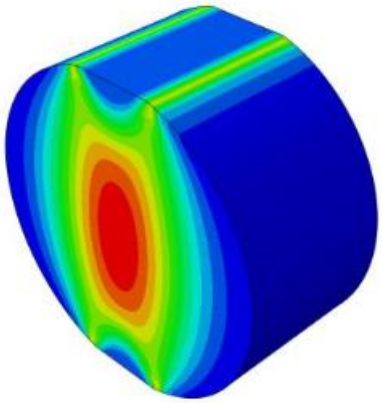
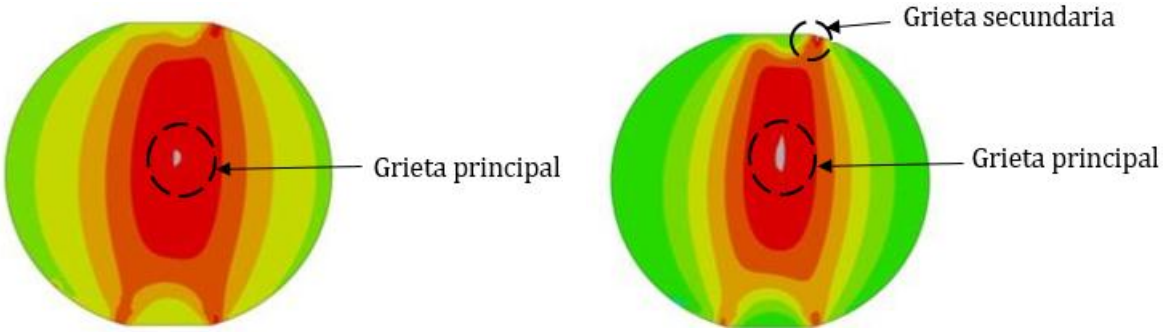


Figura 2: Distribución de la tensión equivalente de Griffith para el disco con caras horizontales paralelas.

En la segunda fase del estudio numérico, se asume que la cara plana inferior es paralela al plano horizontal, mientras que la cara superior está ligeramente inclinada. La Figura 3 representa la distribución en vista frontal de la tensión equivalente para las tolerancias de paralelismo (tol) consideradas como críticas entre las caras horizontales del disco, obtenidas con los modelos MEF tridimensionales. La zona que excede el valor de resistencia a tracción ($\sigma_t = 4.8$ MPa) se representa en color gris, indicando la zona potencial de inicio de la grita en el disco.



(a) (b)

Figura 3: Distribución de la tensión equivalente de Griffith para el disco con diferentes tolerancias de paralelismo de las caras horizontales: (a) tol = 0.05 mm y (b) tol = 0.08 mm

Las tolerancias de paralelismo empleadas para obtener la distribución de tensiones mostrada en la Figura 3 presentan valores muy reducidos, lo que dificulta su consecución práctica durante la preparación de discos de roca u hormigón. Sin embargo, estos resultados permiten evidenciar cómo desviaciones mínimas en el paralelismo de las caras horizontales pueden provocar un desplazamiento del punto de inicio de la grieta respecto del eje central del disco, incrementando así la probabilidad de una fractura prematura en las proximidades de las zonas de contacto.

Según los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, a medida que aumenta la tolerancia de paralelismo, también lo hace la probabilidad de aparición de grietas no centradas en las proximidades de la zona de contacto. Se ha observado que una grieta única y centrada solo está garantizada cuando la tolerancia de paralelismo es inferior a 0.05 mm. Para valores superiores, la zona potencial de inicio de fractura se amplía y tiende a desplazarse hacia el borde donde se concentra una mayor tensión. En estos casos, puede incluso observarse la formación simultánea de una grieta central y otra adicional en el borde más cargado de la cara horizontal del disco.

Cabe señalar que en este estudio solo se muestran los resultados obtenidos para desviaciones de paralelismo observadas en el plano frontal del disco, es decir, paralelismo entre las caras horizontales visto desde una vista frontal, sin tener en cuenta posibles desalineaciones en profundidad, es decir, en dirección perpendicular a dicha vista. En escenarios hipotéticos con errores de este tipo, la fractura podría iniciarse en una de las caras verticales y propagarse hacia la opuesta; no obstante, el inicio de la grieta seguiría siendo central, sin comprometer significativamente la validez del ensayo.

En la práctica, la posibilidad de que existan desviaciones de paralelismo en profundidad es extremadamente baja. Esto se debe a que los discos se obtienen a partir de cilindros de roca previamente mecanizados, y posteriormente se seccionan transversalmente en discos de espesor uniforme (aproximadamente igual al radio del disco) mediante

sierras de alta calidad, lo que asegura tolerancias muy estrictas. A estos discos se les realizan luego dos cortes paralelos desde una cara vertical hacia la otra, generando las caras horizontales. Dado que la profundidad de estos cortes es menor que el diámetro del disco, el riesgo de desviación en esta dirección es muy reducido, por tanto, es razonable asumir que la tolerancia de paralelismo en profundidad es despreciable.

3. Resultados experimentales

Se ensayaron cinco muestras de roca con caras horizontales con diferentes desviaciones de paralelismo para probar experimentalmente el efecto del paralelismo en el éxito del ensayo brasileño con discos de caras horizontales. Hay que señalar que en esta primera fase lo que se quiere es verificar la validez del ensayo, mas no su precisión, ya que esta última solo puede estudiarse cuando se establezca la tolerancia de paralelismo optima y se utilice un número mayor de muestras. Las propiedades geométricas de las muestras utilizadas se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones y tolerancias de las muestras ensayadas.

Espécimen	Diámetro D (mm)	Ángulo de contacto 2α (°)	Espesor t (mm)	Ángulo Θ (°)	Desviación de paralelismo Δ (mm)
N1	50.55 ± 0.06	30.5 ± 0.1	27.58 ± 0.04	0.57 ± 0.19	0.13 ± 0.04
N2	50.12 ± 0.08	34.5 ± 0.1	25.84 ± 0.04	0.53 ± 0.06	0.14 ± 0.05
N3	50.55 ± 0.06	21.3 ± 0.1	28.34 ± 0.07	0.95 ± 0.43	0.15 ± 0.11
N4	50.63 ± 0.05	24.7 ± 0.1	27.41 ± 0.60	1.75 ± 0.00	0.32 ± 0.15
N5	50.56 ± 0.04	30.2 ± 0.1	26.82 ± 0.33	2.07 ± 0.14	0.47 ± 0.18

Las desviaciones de paralelismo se determinaron a partir de mediciones realizadas con un goniómetro digital Digi-Pas, modelo DWL280PRO, calibrado y con una precisión de ±0.05°. Los valores angulares Θ se transformaron posteriormente en tolerancias de paralelismo, de acuerdo con la Ecuación 3, derivada a partir de la geometría mostrada en la Figura 4. Los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 2. La incertidumbre asociada a la tolerancia de paralelismo (Ecuación 4) se estimó aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la Ecuación 3, conforme a la metodología descrita en [26].

$$\Delta = D\,\frac{\sin(\alpha)\sin(\theta)\cos(\alpha)}{\cos(\alpha+\theta)} \cong D\sin(\alpha)\sin(\theta) \tag{3}$$

$$u\Delta = \sqrt{\left[\frac{\partial\Delta}{\partial D}u(D)\right]^2 + \left[\frac{\partial\Delta}{\partial\alpha}u(\alpha)\right]^2 + \left[\frac{\partial\Delta}{\partial\theta}u(\theta)\right]^2} \tag{4}$$

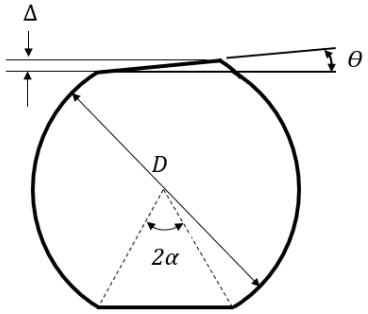


Figura 4: Relación de la tolerancia de paralelismo Δ con el ángulo Θ medido con el goniómetro

Para medir la inclinación Θ entre caras horizontales, la cara inferior del disco se apoyó sobre la mesa de una máquina de medición por coordenadas (Figura 5). Su planitud se verificó previamente utilizando el mismo goniómetro, obteniéndose una desviación máxima de ±0.05°. Por este motivo, dicha cara se considera perfectamente plana a efectos del presente análisis.



Figura 5: Medición de la desviación de paralelismo con el goniómetro digital

Cabe destacar que todos los valores de paralelismo incluidos en la Tabla 2 superan el umbral de 0.08 mm identificado en los modelos numéricos como límite crítico para asegurar la aparición de grietas centradas. No

obstante, representan un rango amplio y realista de tolerancias factibles en condiciones experimentales controladas.

Para identificar la ubicación inicial de la grieta en la cara frontal de cada espécimen y verificar la validez del ensayo, se empleó la técnica de correlación digital de imágenes (DIC). El análisis fue realizado utilizando el software de código abierto Ncorr [27], desarrollado en el entorno Matlab. El moteado aplicado sobre los discos presenta una densidad adecuada conforme a las recomendaciones establecidas por Fazzini *et al.* [28], con un histograma de escala de grises aproximadamente equilibrado (50 % blanco y 50 % negro), lo que garantiza una buena calidad de correlación.

En cuanto a la iluminación, fue necesario utilizar iluminación artificial para asegurar la calidad de la imagen. Para evitar los destellos causados por las fluctuaciones en la intensidad de la luz generadas por la fuente de alimentación de corriente alterna, se emplearon lámparas de corriente continua de 24 voltios.

La máquina de ensayos utilizada tiene una capacidad máxima de 300 kN, y está equipada con un servocontrol automático de tipo hidráulico. Esta máquina requiere una precarga mínima de aproximadamente 2 kN, aunque esta disminuye ligeramente antes de iniciar el proceso de carga. A continuación, avanza a una velocidad predeterminada por el sistema (no seleccionada por el usuario) hasta que se alcanza dicha fuerza. Seguidamente, la máquina reduce levemente la carga y comienza el proceso de carga propiamente dicho, esta vez a la velocidad seleccionada. En nuestro caso, se estableció una velocidad de carga de 0.5 kN/s.

En la Figura 6 se muestra el montaje experimental correspondiente al espécimen N1.

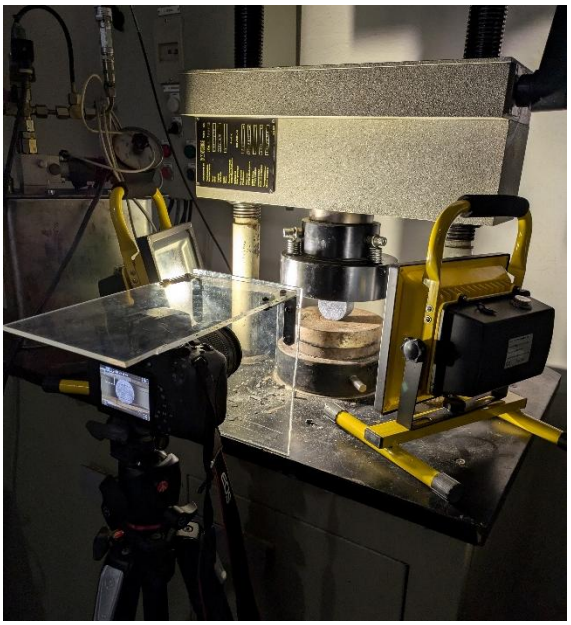


Figura 6: Montaje experimental para la determinación de la zona de rotura en el disco brasileño con caras horizontales N1.

Las especificaciones técnicas para este tipo de ensayos no indican valores específicos de temperatura ni de humedad; sin embargo, sí recomiendan mantener ambas condiciones constantes a lo largo del ensayo, con el fin de garantizar resultados precisos y reproducibles. Las pruebas se llevaron a cabo a una temperatura controlada de 20 °C, aunque no se realizó un registro de la humedad de la sala.

Los patrones de falla observados experimentalmente, así como las predicciones obtenidas mediante correlación digital de imágenes, muestran una buena concordancia con los resultados de los modelos numéricos. En ninguno de los discos ensayados se observó la formación de una grieta central, lo que refuerza la hipótesis de que el paralelismo de las caras juega un papel crítico en la validez de los ensayos con discos de caras horizontales.

Además, debe destacarse que en el contacto entre los platos y las muestras N3, N4 y N5 (Figura 7) se han observado segundas grietas menores, similares a las grietas secundarias también generadas durante el ensayo brasileño convencional. Esta grieta secundaria es un indicador de un campo de tensión local no deseado en la proximidad del contacto, generado por posibles diferencias de rigidez entre el material testado y el plato de compresión o incluso a las heterogeneidades intrínsecas del material de la roca. Este fenómeno es relevante ya que podría actuar como una fuente adicional de incertidumbre en los resultados de la prueba. Sin embargo, se deben realizar más investigaciones para garantizar la fiabilidad de esta última afirmación.

Por otro lado, en el espécimen N3 se observó una propagación de grieta muy rápida y cercana al centro del disco, lo que sugiere un posible ensayo válido. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante DIC indican que la grieta no se origina exactamente en el centro, sino en un costado de la cara horizontal inferior, propagándose luego rápidamente hacia la cara superior.

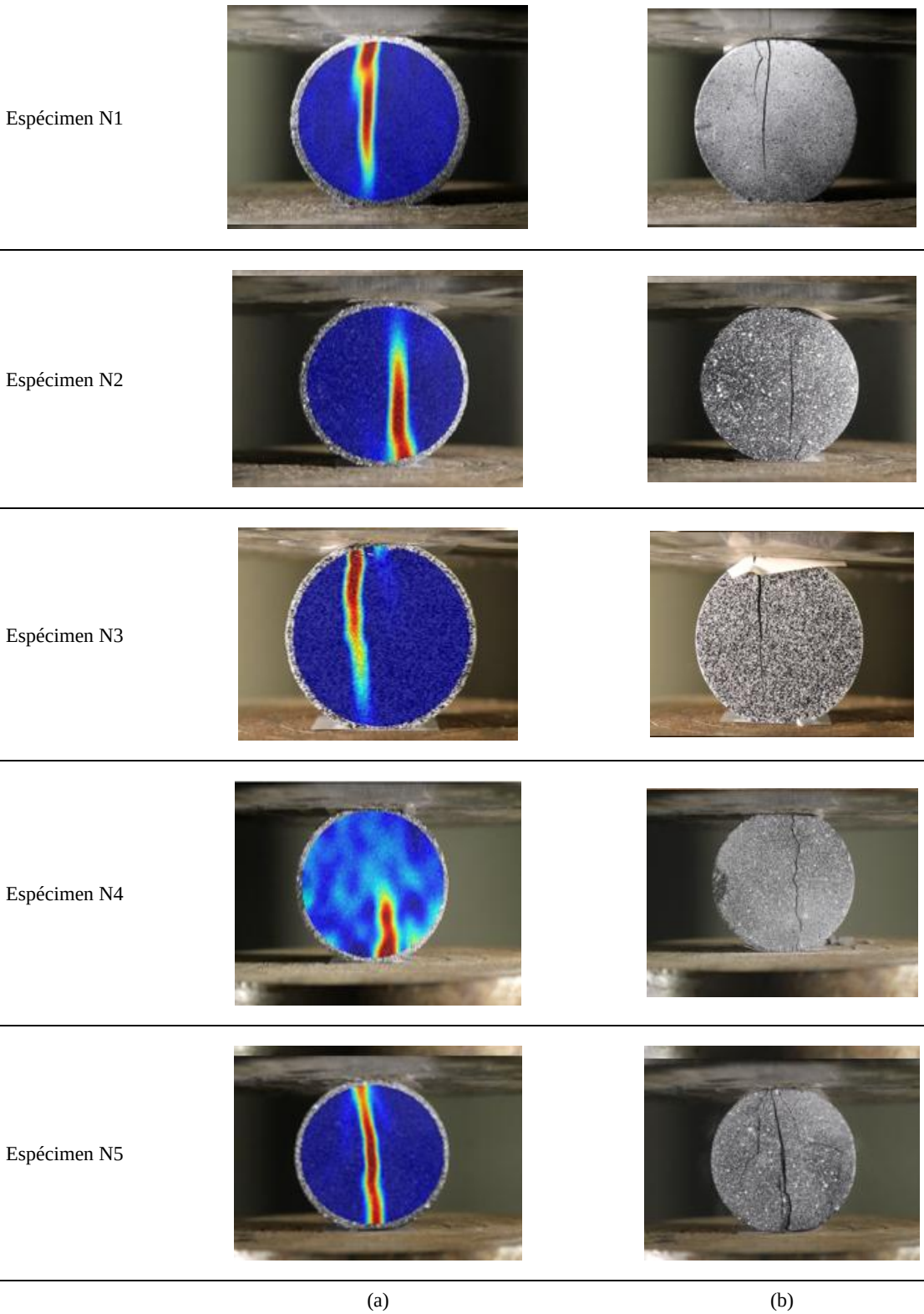


Figura 7: Evidencia experimental de iniciación de grietas excéntricas debido a desviaciones de paralelismo: (a) máxima deformación antes de la rotura observada con DIC, y (b) patrón final de grieta.

Adicionalmente, se emplearon películas de presión en las zonas de contacto entre los platos de compresión y las caras horizontales del disco, con el objetivo de registrar de forma cualitativa las condiciones reales de contacto del ensayo. Estas películas están compuestas por una matriz polimérica que encapsula microcápsulas de tinta reactiva

a la presión. En su estado inicial, las películas presentan una apariencia similar a la de una hoja de papel delgado con un acabado superficial que varía según el rango de presión para el que están diseñadas [29].

Durante el ensayo, las microcápsulas situadas en las regiones sometidas a una presión superior al umbral de activación se rompen, liberando el agente colorante y generando una impresión visual proporcional a la magnitud y distribución de la presión aplicada. Este patrón permite identificar de forma directa las zonas activas de contacto y evaluar la uniformidad del apoyo proporcionado por los platos de compresión.

Las películas de presión revelaron una distribución no uniforme de las tensiones en la interfaz de contacto. En la Figura 8 se presentan los especímenes que registraron, la mayor (figura 8a) y la menor (figura 8b) superficie de contacto, lo que evidencia una diferencia significativa en la forma en que se transmite la carga entre el disco y las placas de compresión.

A pesar de la baja desviación de paralelismo de la muestra N1, su patrón de contacto (Figura 8a) resalta que la distribución de carga es extremadamente sensible a las irregularidades a lo largo de las superficies coincidentes. En este sentido, vale la pena mencionar que aquellas áreas de las películas de presión que no están resaltadas en magenta no significan una ausencia completa de tensión de contacto, simplemente que la tensión no ha alcanzado el umbral de 2.5 MPa de la película de presión empleada.

Esta falta de uniformidad en la distribución de tensiones parece estar relacionada, principalmente, con las marcas dejadas por las herramientas durante el proceso de preparación de las muestras. En consecuencia, es necesario establecer procedimientos adicionales de pulido o eliminación de rugosidad durante los procesos de preparación de la muestra para la obtención de una superficie de contacto más homogénea.

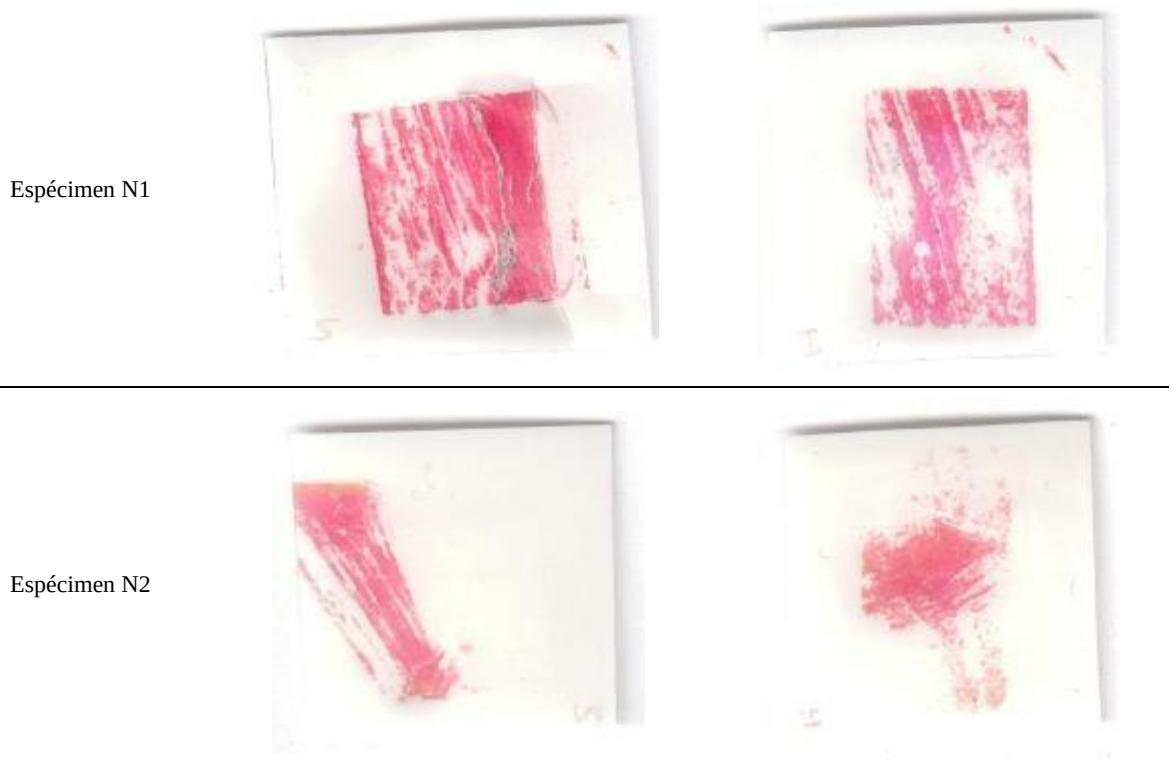


Figura 8: Patrones de contacto con mayores diferencias significativas para el contacto con: (a) el plato de compresión superior y (b) el plato de compresión inferior.

4. Conclusiones

Este estudio pone de manifiesto la relevancia del control geométrico de las superficies de contacto en la validez del ensayo brasileño con discos de caras horizontales. Tanto los resultados experimentales como las simulaciones numéricas evidencian que incluso ligeras desviaciones en el paralelismo de las caras pueden afectar significativamente el modo de rotura del disco. En concreto:

- Para evitar la aparición de microfisuras no deseadas en los bordes de las caras horizontales del disco, la tolerancia de paralelismo no debería exceder los 0.05 mm. No obstante, tolerancias de hasta 0.08 mm podrían ser aceptables desde un punto de vista práctico, siempre que se verifique experimentalmente que

las grietas secundarias en la zona de contacto son locales, es decir, que no se propagan y por tanto no afectan a la validez del ensayo.

- Las marcas de herramienta y la rugosidad superficial pueden alterar el patrón de tensiones en la interfaz de carga, por lo que se recomienda un tratamiento de pulido de las superficies coincidentes, en especial la de las muestras, para minimizar estas irregularidades.

En este sentido, si bien las tolerancias alcanzadas en este trabajo se sitúan por debajo de los límites admisibles identificados, no se ha logrado eliminar por completo la influencia de la concentración de tensiones. Por lo tanto, la preparación adecuada de las muestras continúa siendo un factor determinante para la validez del ensayo.

Este enfoque combinado ha permitido determinar experimental y numéricamente los límites admisibles de tolerancia geométrica que aseguran un desarrollo simétrico de la fisura, condición esencial para la validez mecánica del ensayo brasileño. Asimismo, los resultados obtenidos ofrecen criterios útiles para la fabricación y preparación de especímenes, orientados a minimizar los errores inducidos por imperfecciones geométricas.

Las simulaciones han demostrado ser eficaces para estimar la influencia del paralelismo en la distribución de tensiones y la simetría del campo de esfuerzos en el plano diametral. Por su parte, los ensayos experimentales han permitido validar y complementar estos hallazgos.

Agradecimiento

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de la subvención MCINN-23-PID2022-142015OB-I00 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una manera de hacer Europa".

5. Referencias

[1] ASTM D3967-16, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA (2016).

[2] Ulusay R., Hudson J. (eds), The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, ISRM Turkish National Group and the ISRM, Ankara, Turkey (2007).

[3] UNE 22950-2:2003, "Mechanical properties of rocks. Strength determination tests. Part 2: Traction strength. Indirect determination (Brazilian test)", UNE, Madrid (2003).

[4] ASTM C496/C496M-17, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).

[5] UNE-EN 12390-6 2024, "Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting. Strength of test specimens", UNE, Madrid (2024).

[6] Lin H., Xiong W., Xiong Z., Gong F., "Three-dimensional effects in a flattened Brazilian disk test", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 74, 10–14 (2015).

[7] Lin H., Xiong W., Yan Q., "Modified formula for the tensile strength as obtained by the flattened Brazilian disk test", Rock Mechanics and Rock Engineering 49, 1579–1586 (2016).

[8] García V.J., Márquez C.O., Zúñiga-Suárez A.R., et al., "Brazilian Test of Concrete Specimens Subjected to Different Loading Geometries: Review and New Insights", International Journal of Concrete Structures and Materials 11, 343–363 (2017).

[9] Erarslan N., Liang Z.Z., Williams D.J., "Experimental and numerical studies on determination of indirect tensile strength of rocks", Rock Mechanics and Rock Engineering 45, 739–751 (2012).

[10] Li D., Wong L.N.Y., "The Brazilian disc test for rock mechanics applications: Review and new insights", Rock Mechanics and Rock Engineering 46, 269–287 (2013).

[11] Komurlu E., Kesimal A., Demir S., "Experimental and numerical study on determination of indirect (splitting) tensile strength of rocks under various load apparatus", Canadian Geotechnical Journal 53, 360–372 (2016).

[12] Garcia-Fernandez C.C., Gonzalez-Nicieza C., Alvarez-Fernandez M.I., Gutierrez-Moizant R.A., "Analytical and experimental study of failure onset during a Brazilian test", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 103, 254–265 (2018).

[13] Gutiérrez-Moizant R., Ramírez-Berasategui M., Sánchez-Sanz S., Santos-Cuadros S., "Experimental verification of the boundary conditions in the success of the Brazilian test with loading arcs. An uncertainty

approach using concrete disks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 132, 104380 (2020).

[14] Wang Q.Z., Jia X.M., Kou S.Q., et al., "The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: Analytical and numerical results", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41, 245–253 (2004).

[15] Griffith A.A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 221, 582–593 (1921).

[16] Keles C., Tutluoglu L., "Investigation of proper specimen geometry for mode I fracture toughness testing with flattened Brazilian disc method", International Journal of Fracture 169, 61–75 (2011).

[17] Pourya K., Mehrnoosh H., "Numerical and experimental studies on the effect of loading angle on the validity of flattened Brazilian disc test", Journal of Geology and Mining Research 8, 1–12 (2016).

[18] Mazel V., Guerard S., Croquelois B., et al., "Reevaluation of the diametral compression test for tablets using the flattened disc geometry", International Journal of Pharmaceutics 513, 669–677 (2016).

[19] Stirling R.A., Simpson D.J., Davie C.T., "The application of digital image correlation to Brazilian testing of sandstone", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 60, 1–11 (2013).

[20] Yan Z., Dai F., Liu Y., et al., "New insights into the fracture mechanism of flattened Brazilian disc specimen using digital image correlation", Engineering Fracture Mechanics 252, 107810 (2021).

[21] Zhiyu Q., Zhiqing L., Lei L., et al., "Study on the tensile characteristics of Brazilian split in remolded loess based on resistivity and DIC techniques", Environmental Earth Sciences 83, 11690-3 (2024).

[22] Zhang H., Nath F., Parrikar P.N., Mokhtari M., "Analyzing the validity of Brazilian testing using digital image correlation and numerical simulation techniques", Energies (Basel) 13, 1441 (2020).

[23] Zhiyu Q., Zhiqing L., Lei L., et al., "Study on the tensile characteristics of Brazilian split in remolded loess based on resistivity and DIC techniques", Environmental Earth Sciences 83, 11690-3 (2024).

[24] Sgambitterra E., Lamuta C., Candamano S., Pagnotta L., "Brazilian disk test and digital image correlation: a methodology for the mechanical characterization of brittle materials", Materials and Structures/Materiaux et Constructions 51, 1145-8 (2018).

[25] Pallett P.F., Gorst N.J., Clark L.A., J.W.S., "Friction in Temporary Works", Journal of Engineering (2003).

[26] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), "Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement", JCGM 100:2008, Geneva (2008).

[27] Blaber J., Adair B., Antoniou A., "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software", Experimental Mechanics 55, 1105–1122 (2015).

[28] Fazzini M., Mistou S., Dalverny O., Robert L., "Study of image characteristics on digital image correlation error assessment", Optics and Lasers in Engineering 48(3), 335–339 (2010).

[29] Guerrero-Miguel D.J., Álvarez-Fernández M.I., Ramírez-Berasategui M., Prendes-Gero M.B., González-Nicieza C., "Influence of Platen Stiffness on the Contact Stress Distribution in the Standardized Uniaxial Compression Test", Mathematics 12(13), 1943 (2024).