

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería el Politécnico

**Fractura de Materiales Granulares (Almidón de Maíz) por
Deshidratación Usando Correlación Digital de Imágenes**
Proyecto de Investigación

Krutskaya Irene Yépez Esquivel

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Mecánica

Quito, 14 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIECIAS E INGENIERIA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Fractura de Materiales Granulares (Almidón de Maíz) por Deshidratación
Usando Correlación Digital de Imágenes**

Krutskaya Irene Yépez Esquivel

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico:

Lorena Bejarano, PhD.

Firma del profesor:

Quito, 14 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Krutskaya Irene Yépez Esquivel

Código: 00124905

Cédula de Identidad: 1725409534

Lugar y fecha: Quito, 14 de mayo de 2019

RESUMEN

En este trabajo, se establece un procedimiento experimental para analizar la mecánica de la fractura por deshidratación en un material granular, en este caso una mezcla de maicena y agua. Para esto, se calibró la técnica de DIC, técnica utilizada para determinar la deformación que sufre un material, por medio de ensayos de tracción a probetas de acero. A continuación, se obtuvo mediante experimentación la deformación máxima y la humedad un instante previo a la fractura cuando se induce un concentrador de esfuerzos sobre una muestra. Además, se determinó el patrón de fractura de las muestras manteniendo un mismo espesor de capa. Por otro lado, se realizaron ensayos de compresión a cilindros hechos de maicena con agua y se determinó una correlación entre el módulo de elasticidad y humedad de cilindros al momento del ensayo. Con los valores de humedad antes de la fractura se obtuvo el módulo de elasticidad a esa misma humedad utilizando la correlación entre el módulo de elasticidad y la humedad descrita anteriormente. Finalmente cuantificó el esfuerzo que siente el material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento asumiendo un comportamiento elástico.

Palabras Clave: mud crack, agrietamiento, fractura, DIC, speckle pattern, maicena, materiales granulares, deshidratación.

ABSTRACT

In this work, an experimental procedure is established to analyze the mechanics of dehydration fracture in a granular material, in this case a mixture of cornstarch and water. First, the technique of DIC was calibrated, technique used to determine the deformation suffered by a material, by means of tensile tests on steel specimens. Then, maximum deformation and humidity were obtained by experiment a moment before the fracture when a stress concentrator is induced on a sample. In addition, the fracture pattern of the samples was determined while maintaining the same layer thickness. On the other hand, compression tests were performed on cylinders made of cornstarch with water and a correlation was determined between the modulus of elasticity and humidity of cylinders at the time of the test. With the humidity values before the fracture, the elastic modulus at that same humidity was obtained using the correlation between the elastic modulus and the humidity described above. Finally, it quantified the effort felt by the material before fracturing in the cracking tests assuming an elastic behavior.

Keywords: mud crack, crack, fracture, DIC, speckle pattern, cornstarch, granular materials dehydration.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
INTRODUCCIÓN.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS	15
Calibración del DIC.....	15
Preparación de muestra.....	15
Ensayos de Tracción y video para el DIC.....	18
Post - procesamiento.....	21
Ensayos de agrietamiento de almidón de maíz	22
Preparación de muestras.....	22
Proceso de secado.....	23
Montaje de la cámara para la toma del video.....	24
Post - procesamiento.....	25
Compresión.....	26
Preparación de muestras.....	26
Proceso de Secado	27
Ensayo Mecánico.....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
Calibración del DIC.....	29
Fractura de almidón de maíz.....	32
SEM	32
Patrones de Agrietamiento	34
Deshidratación	36
Deformación antes de la fractura.....	38
Compresión.....	41
Modelo Matemático.....	42
Costos del Proyecto.....	43
CONCLUSIONES.....	46
RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
Anexo 1: parametros colocados en el software para hacer el analisis de imagen de los ensayos de calibracion	51
Anexo 2: parametros colocados en el software para hacer el analisis de imagen de los ensayos de Agrietamientos de muestras de Maicena y Agua.....	53
Anexo 3: Evolucion de las grietas durante el proceso de secado de muestras de maicena y agua.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del lente utilizado durante los ensayos de calibración y los ensayos de agrietamiento (TAMARON, 2019)	18
Tabla 2: Parámetros colocados en la máquina de tracción para la elaboración de los ensayos de calibración.	20
Tabla 3: Parámetros colocado en la máquina de ensayos mecánicos para realizar los ensayos de compresión.....	28
Tabla 4: Velocidad de deformación de las probetas de los ensayos de calibración obtenida por el Ncorr y por la máquina de ensayos universales	32
Tabla 5: Datos de la humedad obtenida a partir del peso dado por la balanza durante el proceso de secado para cada uno de los ensayos de agrietamiento y cálculo del error experimental con respecto a la humedad, al momento de inducir el concentrador de esfuerzos, obtenida a partir de la medición del peso con una balanza que no ha sido afectada por la temperatura del ensayo de agrietamiento.....	38
Tabla 6: Deformación de las muestras de maicena y agua un instante antes de la fractura. 40	
Tabla 7: Tensor de esfuerzos del material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento.....	43
Tabla 8: Presupuesto del proyecto sin incluir costos de máquinas	44
Tabla 9: Presupuesto del proyecto incluido costo de operación de máquinas y adquisición de todos los equipos	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ilustración esquemática de un sistema TBC aplicado a una pala de turbina enfriada por aire	10
Figura 2: a) Micrografía óptica de vista superior de un recubrimiento SPPS que muestra el "mud-flat" pattern (Jadhav et al., 2005) b) Grietas de barro que se forman en un sedimento fangoso al pie de Masada, región del Mar Muerto, Israel (Weinberger, 1999). c) Mud crack en mezclas de maicena y agua por efecto del proceso de secado	11
Figura 3: Dimensiones de la probeta normada utilizada en el ensayo de tracción para la calibración del DIC.....	16
Figura 4: Preparación de la muestra para los ensayos de calibración. a) Sección granallada b) Moleteado c) Speckle Pattern.....	17
Figura 5: Diagrama de montaje para la realización de un correcto speckle pattern	18
Figura 6: a) Configuración experimental para la realización de los ensayos de calibración b) Diagrama de Montaje de los equipos utilizados para los ensayos de calibración.....	19
Figura 7: Procedimiento para la ejecución del ensayo de calibración a) Ajuste de la probeta en la máquina de ensayos universales b) orientación de la luz respecto a la cara de la muestra a analizar c) Orientación de la cámara respuesta a la probeta d) Alineación de la cámara respecto a una escuadra calibrada.....	20
Figura 8: Post-procesamiento del video del ensayo de calibración a) Conversión del video en fotos b) Cambio de nombre y enumeración a las fotos obtenidas a partir del video c) Ajuste del área de las fotos al área que se desea realizar el DIC.....	21
Figura 9: a) Limpieza de los petris previo a colocar la mezcla de maicena y agua b) Secado de los petris sobre la cama caliente c) Forma de colocar la vaselina en los petris	22
Figura 10: a) Mezcla de maicena y agua para realizar los ensayos de agrietamiento c) Petri previamente preparado para realizar los ensayos de agrietamiento c) Muestra final de maicena y agua utilizada para los ensayos de agrietamiento.	23
Figura 11: Variación de las muestras durante el proceso de secado a) Forma y dimensiones del concentrador de esfuerzos b) Muestra de maicena y agua utilizada para los ensayos de agrietamiento c) Muestra después de introducir el concentrador de esfuerzos d) Speckle pattern en las muestras de maicena de los ensayos de agrietamiento	24
Figura 12: a) configuración experimental para la grabación del ensayo de agrietamiento de maicena b) Diagrama del montaje del experimento para la grabación de los ensayos de agrietamiento.....	25
Figura 13: Proceso de elaboración de los cilindros para realizar ensayos de compresión a) Molde de PVC utilizado para secar la mezcla de maicena y agua b) Forma de la mezcla de maicena y agua c) Muestra final antes del proceso de secado en el horno.....	27
Figura 14: a) Extracción de los cilindros para realizar los ensayos de compresión b) forma de los cilindros para los ensayos de compresión c) Forma de montaje de la muestra en la máquina de ensayo mecánicos	28
Figura 15: Ejemplos de las fotos del ensayo No. 4 introducidas en el software Ncorr.....	30
Figura 16: Resultados de la correlación de imágenes obtenidas por el software Ncorr	30
Figura 17: Gráfica de la deformación en función del tiempo de los ensayos de calibración..	31

Figura 18: Fotos de los gránulos de maicena tonados por SEM con una magnificación de a) 250x, b) 500x y c)1000x.....	33
Figura 19: Aglomeración de gránulos de maicena después del proceso de mezcla y evaporación del agua a una temperatura menor de 65°C para evitar gelatinización.	34
Figura 20: Fotos de SEM de una columna de maicena después de agrietarse por un proceso de secado a) 50x b) 100x.....	34
Figura 21: Patrones de fractura de una mezcla de maicena y agua después de un proceso de deshidratación.....	35
Figura 22: Imágenes binarias de los patrones de fractura donde se observan: Primeras grietas (flechas negras) Segundas grietas (flechas tomates) Grietas finales (flechas azules).....	35
Figura 23: Gráfica del peso [g] en función del tiempo [min] durante el proceso de deshidratación de las muestras de maicena y agua	36
Figura 24: Gráfica del porcentaje de humedad con respecto al tiempo [min] para los ensayos de agrietamiento de una mezcla de maicena y agua.....	37
Figura 25: Imágenes de referencia introducidas en el Ncorr para cada ensayo de agrietamiento de muestras de almidón de maíz y agua.....	39
Figura 26: Imágenes antes de la fractura tomadas para determinar la deformación en los ensayos de agrietamientos	39
Figura 27: Análisis de imagen antes de la fractura del material en los 3 ensayos de agrietamiento de muestras de maicena y agua. A) exx B) eyy	40
Figura 28: Grafica del Módulo de Elasticidad en función del Tiempo para los ensayos de compresión.....	41
Figura 29: Módulo de Elasticidad en función del Tiempo de 63% a 65% de humedad	42

INTRODUCCIÓN

El análisis de agrietamiento con modelos alternativos como el material empleado en este estudio ayudan a comprender el comportamiento de fallas en materiales de aplicaciones reales (Groisman & Kaplan, 1994). La principal correlación del agrietamiento por secado se evidencia en suelos por efecto de sequía, lo que se conoce como “*mud cracks*” (Weinberger, 1999). Medir los parámetros esenciales para generar un modelo que describa la formación y propagación de grietas en un material granular sometido a un proceso de deshidratación, relacionando las deformaciones a la que se generan las fractura y las propiedades del material en función de la pérdida de agua, son de mucho valor para aplicaciones en campos de investigación de falla tales como : fractura en concreto, recubrimientos duros, biomateriales, reología de suelos, geingeniería, agregación de polvos, etc. (Schmeink, Goehring, & Hemmerle, 2017). En el caso de recubrimientos tipo TBC (Thermal barrier coatings) la forma de agrietamiento tipo *mud crack* permite obtener grietas verticales que atraviesan toda la capa, como se muestra en la figura 1, proporcionando *strain tolerance* aumentando la durabilidad de los recubrimientos a altas temperaturas (Jadhav, Pature, Wu, Jordan, & Gell, 2005).

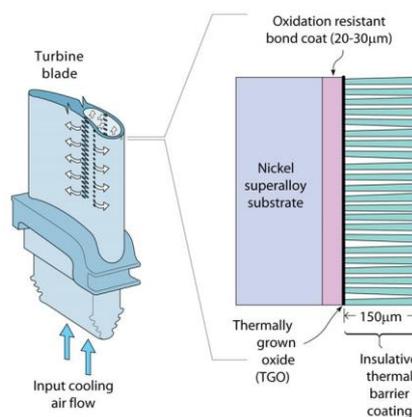


Figura 1: Ilustración esquemática de un sistema TBC aplicado a una pala de turbina enfriada por aire (University of Virginia, 2013).

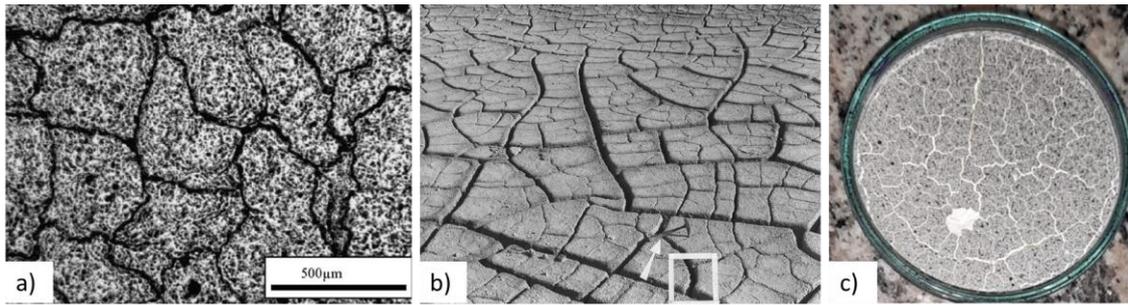


Figura 2: a) Micrografía óptica de vista superior de un recubrimiento SPPS que muestra el "mud-flat" pattern (Jadhav et al., 2005) b) Grietas de barro que se forman en un sedimento fangoso al pie de Masada, región del Mar Muerto, Israel (Weinberger, 1999). c) Mud crack en mezclas de maicena y agua por efecto del proceso de secado

El patrón de fractura conocido como "*mud crack*" genera arreglos de grietas que dividen al material en finas columnas prismáticas con propagación hacia abajo, como se puede ver en la figura 2 (nuclean en la superficie y terminan en la profundidad) (Weinberger, 1999). Diversas observaciones de campo y experimentos de laboratorio han podido determinar que las fracturas nuclean en defectos como microcracks, en irregularidades en la forma de los gránulos o en concentradores de esfuerzos inducidos debido a que en estas zonas el esfuerzo generado por el proceso de secado se maximiza llegando a superar la resistencia última a la tracción del material granular (Weinberger, Survey, & Street, 2001). Existen diversos factores que afectan la formación de patrones de fractura y la propagación de grietas como: composición del material, temperatura, humedad, tipo solvente, tasa de secado, etc. (Khatun, Dutta, & Tarafdar, 2015). El fenómeno de *mud crack* se puede observar en el proceso de secado de: suelos, mezclas de café - agua, mezclas de almidón - agua, etc. (Groisman & Kaplan, 1994).

Las grietas por secado se forman si se restringe la contracción del material debido a la pérdida del líquido aglutinante (en este caso agua) o si se generan esfuerzos que superen la

resistencia a la tracción del mismo (Tang, Shi, Cui, Liu, & Gu, 2012). Generalmente las restricciones se deben a condiciones de fricción o límites de desplazamiento, además de la presencia de cualquier concentrador de esfuerzos propios (textura o granulado grueso) o inducidos durante el proceso de secado (Peron, Laloui, Hu, & Hueckel, 2013). Los concentradores de esfuerzos son discontinuidades presentes en cualquier parte del material que alteran la distribución de los esfuerzos en sus alrededores (Budynas & Nesbett, 2008). Estas discontinuidades generan una reducción en la resistencia a la fractura de los materiales por que los esfuerzos aplicados se magnifican o se concentran en las puntas de los concentradores de esfuerzos; esta amplificación depende de la orientación y de la geometría de los concentradores de esfuerzos (Callister & Rethwisch, 1940).

Con el propósito de recrear patrones de fractura tipo *mud crack* y evaluar con precisión la deformación a la que el material comienza a agrietarse en los extremos del concentrador de esfuerzos inducido manualmente durante el proceso de secado se utiliza una técnica óptica denominada Correlación Digital de Imágenes con siglas en inglés DIC (Digital Image Correlation). La técnica DIC permite detectar y cuantificar desplazamientos en una muestra por medio de la comparación de imágenes antes y después de que el material sufra alguna deformación (Julien, 2009). DIC permite determinar la deformación de un material, en un plano bidimensional, mediante la comparación de imágenes sucesivas antes y después de que el material sea sometido a algún tipo de esfuerzo. Estas imágenes pueden ser tomadas usando una cámara digital convencional, que satisfaga las necesidades de resolución del software (McCormick, 2012). A diferencia de otras técnicas de medición de deformaciones como el uso de galgas extensiométricas o de extensómetros, que están limitados a mediciones puntuales, el DIC permite obtener un análisis de toda la superficie de un material que se encuentra sometido a algún tipo de carga (Fayyad & Lees, 2014). DIC permite hacer

un análisis con fotografías tomadas a gran distancia entre la muestra y la cámara. Entre más frecuente sea la toma de fotos, mayor será la cantidad de información obtenida durante el ensayo. Para poder determinar correctamente los desplazamientos efecto de la deformación, es necesario pintar la muestra haciendo un “speckle pattern”, la ventaja es que la pintura utilizada para obtener la textura de la superficie para el análisis no afecta las propiedades del material (Julien, 2009).

El material granular escogido y con el que se puede apreciar el fenómeno de agrietamiento conocido como “*mud crack*” es maicena o almidón de maíz mezclado con una fracción controlada de agua. El almidón de maíz es muy utilizado dentro de la industria alimenticia, es fácil de adquirir, tiene un bajo costo, es fácil de interpretar y tiene características conocidas. En países como los Estados Unidos, en el 2016, el 10% de la producción total de maíz fue usada para producir maicena (Stutelberg et al., 2017). En estudios realizados con mezclas de maicena y agua, durante el proceso de secado se observan 3 escenarios: el contenido de agua disminuye uniformemente, se forman grietas que poseen una estructura uniforme a lo largo de la dirección vertical y el contenido de agua disminuye lentamente, por lo que la humedad de la muestra no es uniforme (Nishimoto, Mizuguchi, & Kitsunezaki, 2007). Por efecto de la forma en la que se mezcla, el agua y el almidón (que tiene forma granular), se generan poros compuestos de una fase gaseosa (aire y vapor), dentro de una fase sólida (gránulos), y una fase líquida (agua), este medio poroso se encuentra presente en la mayoría de materiales granulares (Nishimoto et al., 2007).

En este trabajo, se establece un procedimiento experimental para analizar la mecánica de la fractura por desecación del material de estudio. Para esto, primero se busca determinar la precisión de la técnica de DIC por medio de la comparación simultánea con ensayos de

tracción en probetas de acero. A continuación, se busca obtener mediante experimentación la deformación máxima y la humedad un instante previo a la fractura y también cuando se induce un concentrador de esfuerzos haciendo un corte sobre la muestra. Además, se busca determinar un patrón de fractura de las muestras manteniendo un mismo espesor de capa. Por otro lado, se realiza cilindros hechos de maicena con agua, en la misma relación de mezcla y después de un secado controlado, se realiza ensayos de compresión y se busca encontrar una correlación entre el módulo de elasticidad y humedad de cilindros en el ensayo. Con los valores de humedad antes de la fractura (determinado en los ensayos de agrietamiento) se determina el módulo de elasticidad a la misma humedad en la que el material se fractura. Finalmente se pretende encontrar una cuantificación matemática del esfuerzo que siente el material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección, se discute acerca de los materiales utilizados para la elaboración de las muestras a analizar, los equipos e implementos necesarios para la ejecución de los ensayos y los métodos realizados para cada uno de los ensayos. La técnica utilizada en el desarrollo del estudio que se presenta en este documento es DIC “Digital Image Correlation”. En primer lugar, es necesario demostrar que el DIC permite obtener resultados adecuados; para esto, se procedió a realizar ensayos de tracción en acero y se comparó los resultados obtenidos por una máquina de ensayos universales realizando ensayos de tracción con los resultados obtenidos usando DIC. A continuación, se realizaron ensayos de agrietamiento en las muestras de maicena y agua para determinar la deformación máxima antes de la fractura y los patrones de fractura. Finalmente, se realizó ensayos de compresión de cilindros elaborados con de maicena y agua controlando diferentes porcentajes de humedad para poder determinar el módulo de elasticidad.

Calibración del DIC.

Preparación de muestra.

Las muestras utilizadas para la calibración del experimento se realizaron en acero A36. Este material es de bajo contenido de carbono (0.25% a 0.29%), laminado en caliente, tiene un límite de fluencia de 250 MPa y una resistencia a la tracción de 400 a 550 MPa (MatWeb, n.d.).

Las probetas fueron elaboradas bajo la norma ASTM E8/E8M-13 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. Las dimensiones de las probetas para este ensayo

se muestran en la figura 3. Para obtener esta forma, se cortaron las planchas de acero utilizando chorro de agua con el objetivo de que no se afecte al material.

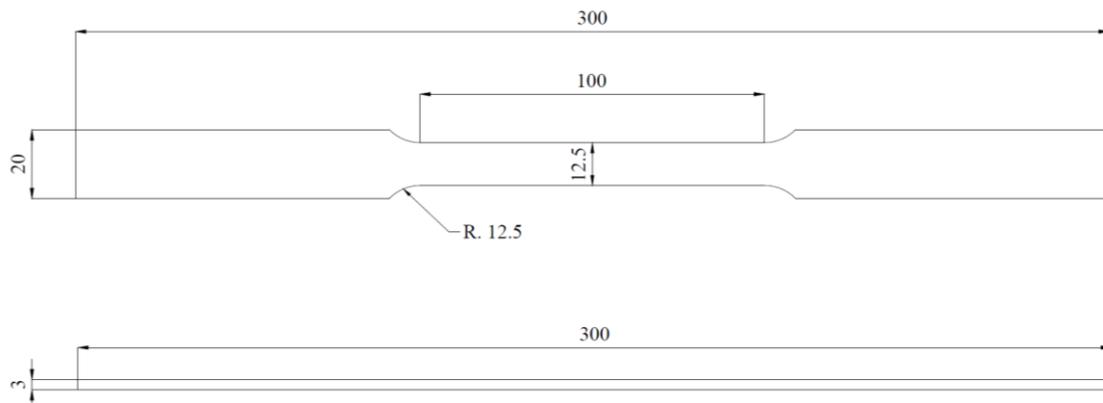


Figura 3: Dimensiones de la probeta normada utilizada en el ensayo de tracción para la calibración del DIC

Con ayuda de una pistola de *sand blasting*, se procedió a granallar la cara frontal de cada una de las probetas, como se muestra en la figura 4 a). Para eso se utilizó una granalla mineral de 0.5 mm. Este procedimiento se lo realiza con el objetivo de garantizar una mejor adherencia de la pintura del speckle pattern en la probeta de acero y evitar desprendimiento de pintura durante el ensayo de tracción. Para evitar que las probetas deslicen al momento de realizar los ensayos de tracción y mejorar el anclaje, se realiza moleteado manualmente en los extremos de cada probeta con un cincel de acero templado de 16 mm como se puede observar en la figura 4 b). A continuación, se procedió a la limpieza de las muestras con ultrasonido utilizando una *UltraMet 2002 Sonic Cleaner BUEHLER*. Para limpiar correctamente las probetas se llenó de agua destilada el contenedor del limpiador hasta la línea marcada y se colocó una por una las probetas durante 15 min cada lado.

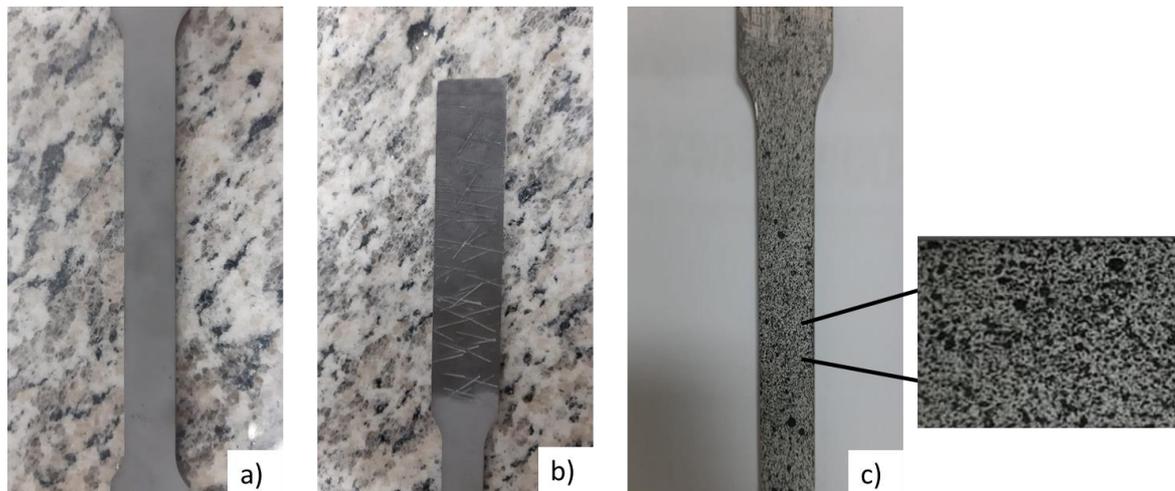


Figura 4: Preparación de la muestra para los ensayos de calibración. a) Sección granallada b) Moleteado c) Speckle Pattern

Para utilizar la técnica DIC es necesario tener un contraste entre puntos blancos y negros, llamado *speckle pattern*, a lo largo de la probeta; esto permite rastrear la posición de cada uno de los puntos durante el ensayo. El desplazamiento de los puntos durante el ensayo de tracción permite determinar la deformación de la probeta en cada instante del ensayo. Antes de realizar el *speckle pattern*, se colocó la muestra sobre una mesa y con pintura en aerosol color blanco mate SE 1007 se procedió a darle una base de pintura a toda la sección que se analiza; este procedimiento se lo realizó a los 2 lados de la muestra dejándola secar por unos 10 minutos cada lado. Para obtener un correcto patrón de salpicadura, se posicionó la probeta como se muestra en la figura 5, respetando las dimensiones especificadas, y se accionó la pintura en aerosol color negro mate SE 4; este procedimiento se realizó hasta que la pieza tenga una apariencia uniforme como se muestra en la figura 4 c).

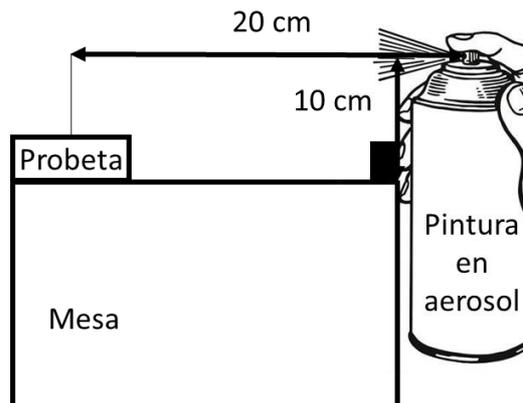


Figura 5: Diagrama de montaje para la realización de un correcto *speckle pattern*

Ensayos de Tracción y video para el DIC

Para realizar de los ensayos se tracción, se utilizó una máquina de ensayos mecánicos Tinius Olsen 300 KN, una cámara SONY ILCA-77M2 con una resolución de 24 MP para video y un lente “Tamron SP AF 60mm F/2.0”, en la tabla 1 se describen todas las características del lente, un trípode FOTOMATE y un juego de luces led de alta intensidad.

Tabla 1: Características del lente utilizado durante los ensayos de calibración y los ensayos de agrietamiento (TAMARON, 2019)

Lente “Tamron SP AF 60mm F/2.0”	
Distancia focal [mm]	60
Apertura máxima	F/2.0
Distancia mínima de los objetos [m]	0.23
Relación de ampliación máxima	1:1
Tamaño de filtro [mm]	55
Peso [g]	350

En la figura 6 a) se puede observar cómo se monta en experimento antes de realizar el ensayo de tracción. Para la ejecución del ensayo de tracción, todos los equipos son colocados respetando la posición y las medidas detalladas en la figura 6 b).

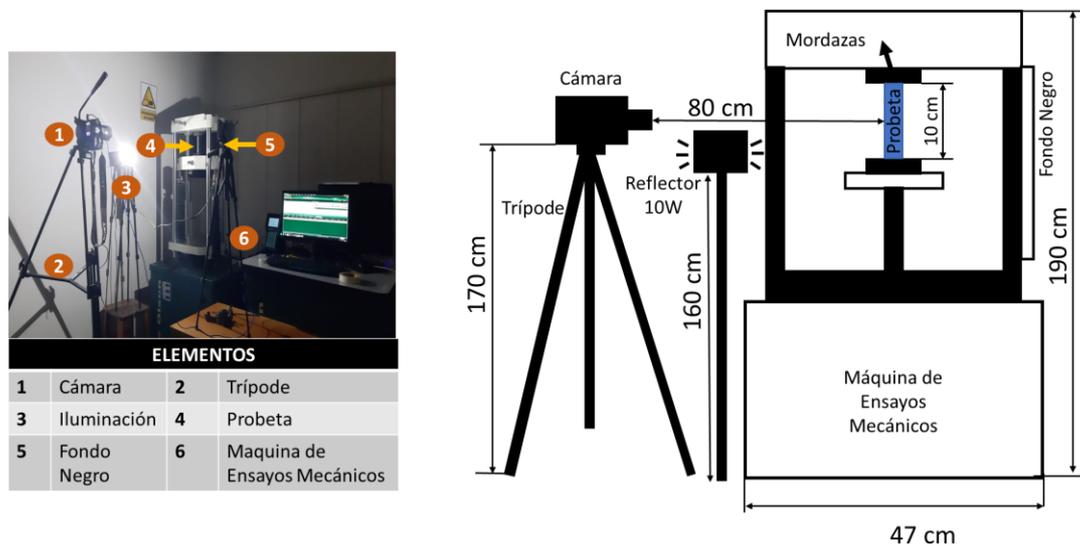


Figura 6: a) Configuración experimental para la realización de los ensayos de calibración b) Diagrama de Montaje de los equipos utilizados para los ensayos de calibración.

Primero se colocó las muestras, de acero A36 previamente preparada, dentro de la máquina de tracción, como se observa en la figura 7 a). Se ajusto la probeta de tal forma que la longitud de trabajo (*gauge leng*) quede fuera de las mordazas. Después, se colocan los focos en trípodes de cámara y se orienta la luz a 90 grados en posición frontal de la probeta que se desea analizar, esto se puede observar en la figura 7 b). Se colocó la cámara con su respectivo trípode de tal forma que el lente de la cámara apunte en línea recta a la probeta que se va a ensayar, como se muestra en la figura 7 c). Con ayuda de un cable de datos, se conectó la cámara a la computadora con el objetivo de tener una mejor vista al momento de enfocar a la probeta con la cámara. Para garantizar que la cámara está alineada con la probeta, se empato las líneas verticales de la cuadrícula dada por el software SONY Remote Camera Control, con una escuadra calibrada colocada sobre la base de la máquina de tracción (lower crosshead); esto se muestra en la figura 7 d).

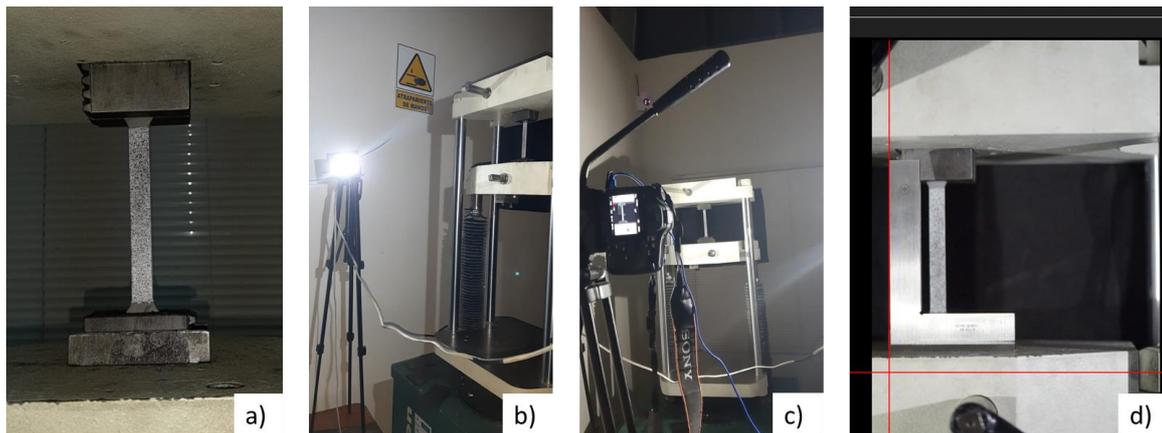


Figura 7: Procedimiento para la ejecución del ensayo de calibración a) Ajuste de la probeta en la máquina de ensayos universales b) orientación de la luz respecto a la cara de la muestra a analizar c) Orientación de la cámara respuesta a la probeta d) Alineación de la cámara respecto a una escuadra calibrada.

Los parámetros colocados en la máquina de ensayos universales fueron determinados en función a la norma ASTM E8/E8M-13 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. En la tabla 2 se muestran todos los parámetros colocados en la máquina para realizar los ensayos de tracción.

Tabla 2: Parámetros colocados en la máquina de tracción para la elaboración de los ensayos de calibración.

Velocidad de Avance del Pistón	2.5 [mm/min]
Precarga	1 [kN]
Ancho de la Probeta	12.8 ±0.05 [mm]
Espesor de la Probeta	3 ±0.07 [mm]
Longitud de Trabajo (GL)	100 [mm]

Después de colocar los parámetros y configurar la cámara, se procede a realizar el ensayo de tracción y la toma del video para el DIC. Se inicia el ensayo en la máquina de tracción y al mismo tiempo se comienza a grabar. Cuando la probeta se rompe y la maquina detecta que

fallo, se detiene la cámara. Es importante que tanto la cámara como la maquina tengas el mismo tiempo de ensayo para poder realizar un correcto análisis posterior.

Post - procesamiento

Para poder realizar el DIC es necesario realizar cambios en el video tomado durante el experimento. Para las modificaciones necesarias del video se utilizó los siguientes softwares gratuitos: “ImageJ”, “Free Video to JPG Converter” y “Bulk Rename Utility”. Mientras que para realizar la correlación digital de imágenes se utilizó un programa de MATLAB, de acceso libre, llamado “Ncorr v1.2”. Como primer paso, se extrajo el video de la cámara y con ayuda del software “Free Video to JPG Converter” se transformó el video en una secuencia de imágenes con una diferencia de tiempo de 2 segundos entre ellas, esto se puede ver en la figura 8 a). A continuación, se utilizó el software “Bulk Rename Utility” para cambiar en nombre y enumerar a cada foto obtenida a partir del video como se muestra en la figura 8 b). Seguidamente, el software “ImageJ” se utilizó para cortar las fotos y obtener solo la parte que se analizar en el “Ncorr”, como se puede apreciar en la figura 8 c). Finalmente, siguiendo el manual de uso del software Ncorr, que se encuentra en la página web oficial del software, se procedió a hacer la correlación de imágenes con el objetivo de encontrar la deformación que sufre la probeta de acero durante el ensayo de tracción.



Figura 8: Post-procesamiento del video del ensayo de calibración a) Conversión del video en fotos b) Cambio de nombre y enumeración a las fotos obtenidas a partir del video c) Ajuste del área de las fotos al área que se desea realizar el DIC

Ensayos de agrietamiento de almidón de maíz

Preparación de muestras

Para realizar los ensayos de agrietamiento del almidón, primero se realiza una limpieza a los envases petri de 50 mm de diámetro como se observa en la figura 9 a). Los recipientes se lavan y se dejan secar, posteriormente se los vuelve a lavar con agua destilada, se los agita un poco, se rocía alcohol y se los coloca sobre la cama caliente hasta que el alcohol se haya evaporado por completo como se observa en la figura 9 b). Después de aproximadamente 10 min, se retira el petri de la cama caliente y se unta vaselina en las paredes del envase, hay que evitar colocar vaselina en la parte inferior haciendo un movimiento circular a lo largo del petri, esto se muestra en la figura 9 c).

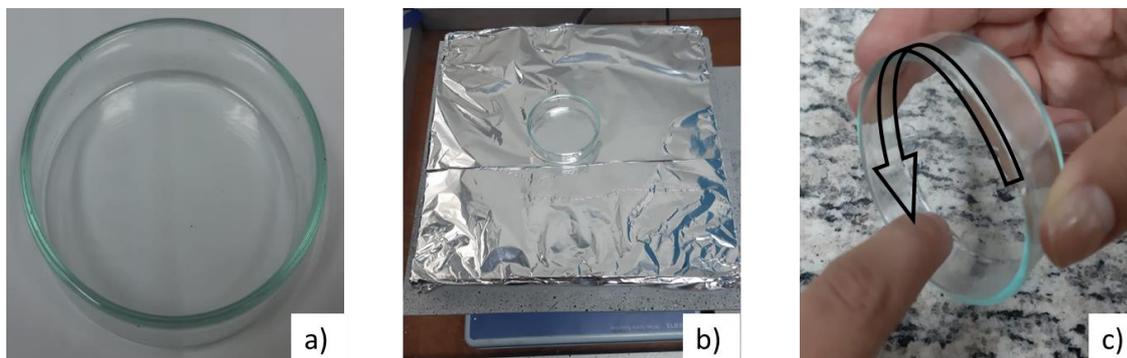


Figura 9: a) Limpieza de los petris previo a colocar la mezcla de maicena y agua b) Secado de los petris sobre la cama caliente c) Forma de colocar la vaselina en los petris

En un envase de plástico se realiza la mezcla de maicena con agua a una relación de fracción 4:3. Para esto, se coloca el envase de plástico sobre una balanza SHIMADZU ELB3000, misma que tiene una resolución de 0.1 g, fija la balanza en cero y se coloca 12g de maicena. Después se vuelve a fijar la balanza en cero y se añade 9 g (9 ml) de agua destilada. Con ayuda de un agitador de vidrio, se mezcla hasta obtener una masa uniforme, como se muestra en la

figura 10 a). Finalmente, se coloca un petri, previamente preparado, sobre la balanza y se tara, como se ve en la figura 10 b), y se vierte la mezcla hasta obtener 21 g, esto se puede ver en la figura 10 c).



Figura 10: a) Mezcla de maicena y agua para realizar los ensayos de agrietamiento c) Petri previamente preparado para realizar los ensayos de agrietamiento c) Muestra final de maicena y agua utilizada para los ensayos de agrietamiento.

Proceso de secado

Para el proceso de secado, se utiliza una cama caliente PCB Heatbed MK2B. Primero, se precalienta la cama caliente a una temperatura que varía de 68 a 70 grados y se la coloca sobre la balanza. A continuación, se coloca el petri sobre la cama caliente y se enciende el cronometro. Durante todo el proceso de secado es necesario tomar datos de peso y temperatura de la muestra cada 2 min para tener un control del proceso de deshidratación. Estos valores se los toma cuando la cama caliente se encuentra apagada para evitar medidas erróneas debido al campo magnético generado por la cama caliente. Después de 28 min, se saca el petri y se lo pesa en otra balanza; esto se hace para verificar el peso del petri con una balanza que no ha sido sometida a temperatura y poder disminuir el porcentaje de error en las mediciones del porcentaje de humedad. Si la mezcla perdió 1.1 g de agua, significa que ya se puede realizar el *speckle pattern*; caso contrario, se debe volver a colocar la muestra sobre la cama caliente hasta que pierda la cantidad de agua antes indicada. Cuando la probeta esta

lista, se debe realizar el concentrador de esfuerzos (una incisión del material) con ayuda de una pieza de acero templado cortada con hilo con la forma que se muestra en la figura 11 a); para esto, se introduce el concentrador en la parte media de la probeta de maicena como se muestra en la figura 11 c). Finalmente, se procede a realizar el *speckle pattern* siguiendo el esquema que se muestra en la figura 5 hasta obtener un patrón similar al que se muestra en la figura 11 d)

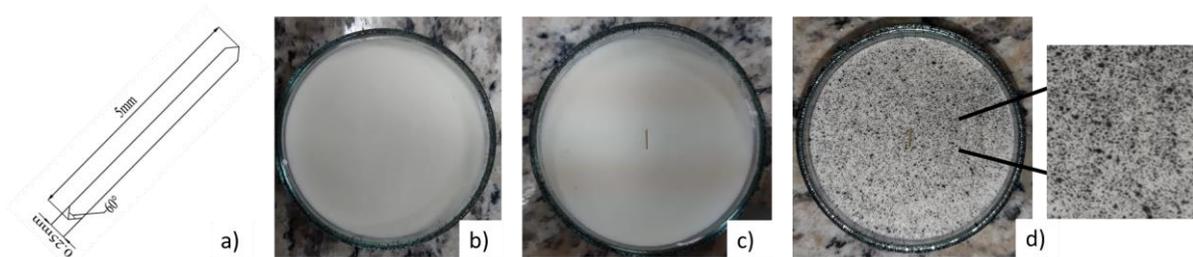


Figura 11: Variación de las muestras durante el proceso de secado a) Forma y dimensiones del concentrador de esfuerzos b) Muestra de maicena y agua utilizada para los ensayos de agrietamiento c) Muestra después de introducir el concentrador de esfuerzos d) *Speckle pattern* en las muestras de maicena de los ensayos de agrietamiento

Montaje de la cámara para la toma del video

La calidad de las imágenes obtenidas durante el ensayo afecta directamente a la precisión de los resultados dados por el software Ncorr; por esta razón, para obtener el video del ensayo se debe seguir el diagrama mostrado en la figura 12. Para la grabación del video del ensayo se colocó: 2 luces led, 2 cartulinas para que las muestras reciban de 9 a 11 lux y una cámara SONY ILCA-77M2 con una resolución de 24 MP para video y un lente “Tamron SP AF 60mm F/2.0”, en la tabla 1 se describen todas las características del lente.

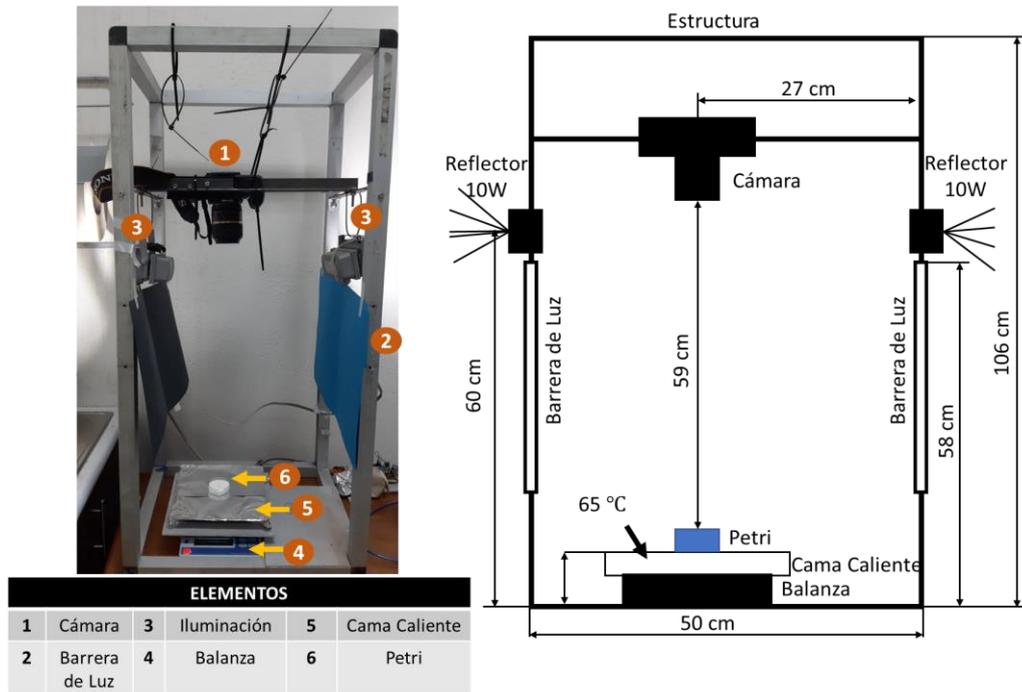


Figura 12: a) configuración experimental para la grabación del ensayo de agrietamiento de maicena b) Diagrama del montaje del experimento para la grabación de los ensayos de agrietamiento

Previo a la ejecución del ensayo, se colocan todos los equipos respetando las dimensiones, ángulos y posiciones especificadas en la figura 12 b). Para un mejor entendimiento en la figura 12 a) se muestra una foto del montaje del experimento. A continuación, se coloca el petri pintado sobre la cama caliente, se apagan las luces del cuarto, se encienden las luces led y se comienza a gravar el video aproximadamente durante 1 hora. El tiempo total de duración del ensayo varía en función a la velocidad con la que se fractura la muestra, en promedio dura 100 min.

Post – procesamiento

Para realizar el post-procesamiento del video obtenido durante el ensayo de agrietamiento se utilizó los mismos programas y se realizó el mismo proceso descrito en el post-procesamiento de los ensayos de calibración detallado gráficamente en la figura 8.

Compresión

Preparación de muestras

Las muestras necesarias para realizar los ensayos de compresión se fabricaron bajo la norma ASTM D2166-00 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil". Para esto, primero se cortaron cilindros de PVC de 48 mm de diámetro interior y 100 mm de altura. Antes de colocar la mezcla de la muestra es necesario realizar una limpieza a la parte interna de cada uno de los cilindros; para esto, se debe enjuagar los tubos con agua destilada, dejarlos secar por unos 5 min y luego con limpiarlos con alcohol. Para evitar que la mezcla de maicena se pegue a las paredes del PCV, se recubre con vaselina la parte interna de los cilindros. Para sellar la parte inferior se coloca plástico para alimentos y se enrolla con cinta adhesiva a lo largo del cilindro, esto se puede ver en la figura 13 a). Finalmente se anota el peso de cada uno de los cilindros después del proceso antes descrito.

Para realizar la mezcla de maicena y agua se sigue la misma relación 4:3 con la que se realizó los ensayos de agrietamiento. La mezcla se la realiza en un envase de plástico como se muestra en la figura 13 b). El procedimiento por seguir es: colocar el envase de plástico sobre la balanza SHIMADZU ELB3000, fijar en cero la balanza y añadir 120g de maicena, volver a fijar en cero para asegurar verter 90g de agua destilada. La mezcla se agita hasta obtener una mezcla uniforme como se muestra en la figura 13 b). Por último, se vierte la mezcla en los cilindros de PVC previamente preparados y anota el peso final equivalente a la masa de la mezcla y a la masa del PVC, como se muestra en la figura 13 c).

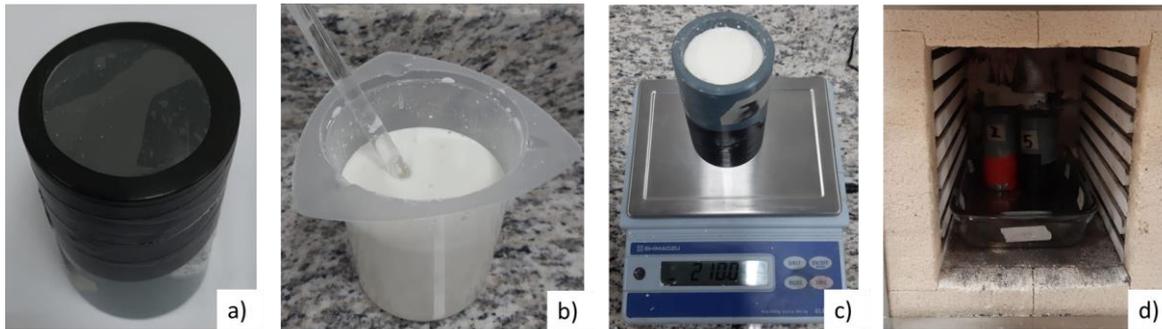


Figura 13: Proceso de elaboración de los cilindros para realizar ensayos de compresión a) Molde de PVC utilizado para secar la mezcla de maicena y agua b) Forma de la mezcla de maicena y agua c) Muestra final antes del proceso de secado en el horno.

Proceso de Secado

Para el proceso de secado de los cilindros para los ensayos de compresión se debe precalentar el horno CARBOLITE a 65 grados centígrados por una hora. Después, se colocan las muestras sobre un envase de vidrio resistente a temperatura y se las introduce en el horno como se puede observar en la figura 13 d). El proceso de secado dura aproximadamente 10 horas a 65°C. El tiempo final de secado depende de la humedad final se desea obtener en cada uno de los cilindros.

Ensayo Mecánico

Para realizar los ensayos de compresión, se utilizó una máquina de ensayos mecánicos Tinius Olsen 300Kn y los cilindros preparados anteriormente. Los parámetros que se deben colocar en la máquina de ensayos mecánicos se determinaron a partir de la norma ASTM D2166-00 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil". En la tabla 3 se muestra los parámetros colocados en la máquina. El valor exacto del diámetro y la longitud de trabajo depende de cada muestra.

Tabla 3: Parámetros colocado en la máquina de ensayos mecánicos para realizar los ensayos de compresión

Velocidad de Avance del Pistón	0.9 [mm/min]
Precarga	NA
Diámetro de la Probeta	48.1 ± 0.6 [mm]
Longitud de Trabajo (GL)	90.4 ± 1.05 [mm]

Para realizar los ensayos, primero se pesa cada uno de los cilindros para poder determinar el porcentaje de humedad de la muestra. A continuación, con ayuda de émbolo del mismo diámetro de la parte interna del cilindro de PVC, se extrae el cilindro cuidadosamente para evitar que se rompa, como se observa en la figura 14 a) hasta sacarlo completamente del PVC y obtener la muestra como se muestra en la figura 14 b). Se mide el diámetro y la altura de cada una de las muestras y esos datos se coloca en la máquina de tracción. Finalmente, se coloca el cilindro sobre la base de la máquina de tracción y se enciende de máquina para comenzar el ensayo como se puede ver en la figura 14 c). El ensayo termina cuando en el software de la maquina se visualiza que la gráfica esfuerzo-deformación comienza a decrecer.

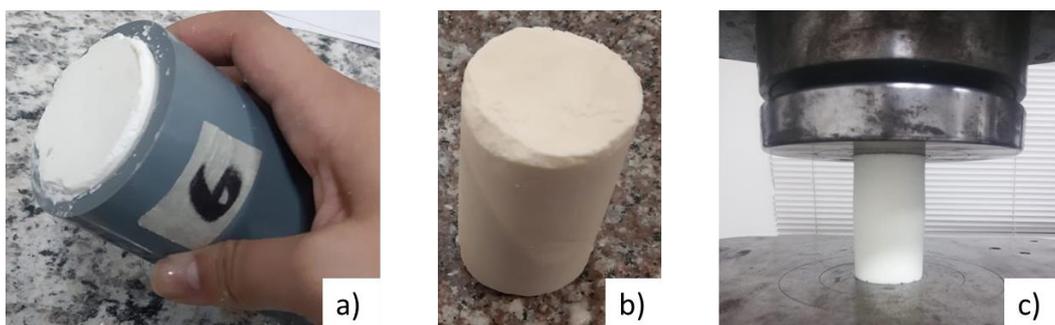


Figura 14: a) Extracción de los cilindros para realizar los ensayos de compresión b) forma de los cilindros para los ensayos de compresión c) Forma de montaje de la muestra en la máquina de ensayo mecánicos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se reportan los resultados obtenidos para los 3 ensayos realizados; los cuales son: calibración del experimento, agrietamiento de almidón de maíz y ensayos de compresión. Se proporciona un análisis de los resultados obtenidos basado en la relación que existe entre cada ensayo y una cuantificación matemática del esfuerzo que sufre el material antes de la fractura en los ensayos de agrietamiento. Además, se muestra fotos obtenidas con SEM que permiten determinar que la morfología de los gránulos de almidón no cambia su morfología durante el proceso de secado, lo que corrobora que se puede utilizar almidón de maíz para todos los experimentos realizados.

Calibración del DIC.

Para poder determinar el error experimental de la técnica DIC por medio del software NCorr, se procedió a hacer el análisis de las probetas de acero A36. En la figura 15 se muestra un ejemplo de las fotos, de uno de los ensayos, utilizadas para el análisis de imagen. Un mayor detalle de los parámetros, para todos los ensayos de calibración, colocados en el software se encuentra en el anexo 1.

Como resultados de la correlación de imágenes, se obtiene un conjunto de imágenes en escala de colores que representa la deformación que sufrió cada conjunto de píxeles en función al tiempo de ensayo. Como se muestra en la figura 16, para cada imagen introducida en el Ncorr se obtiene la deformación y una barra en la parte lateral donde se indica el rango en el que se encuentran las deformaciones.

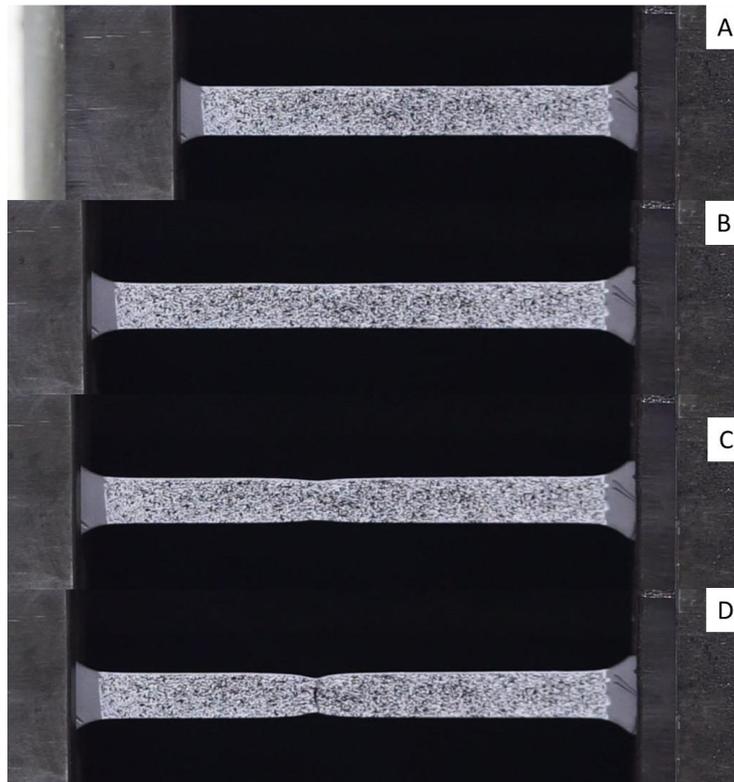


Figura 15: Ejemplos de las fotos del ensayo No. 4 introducidas en el software Ncorr

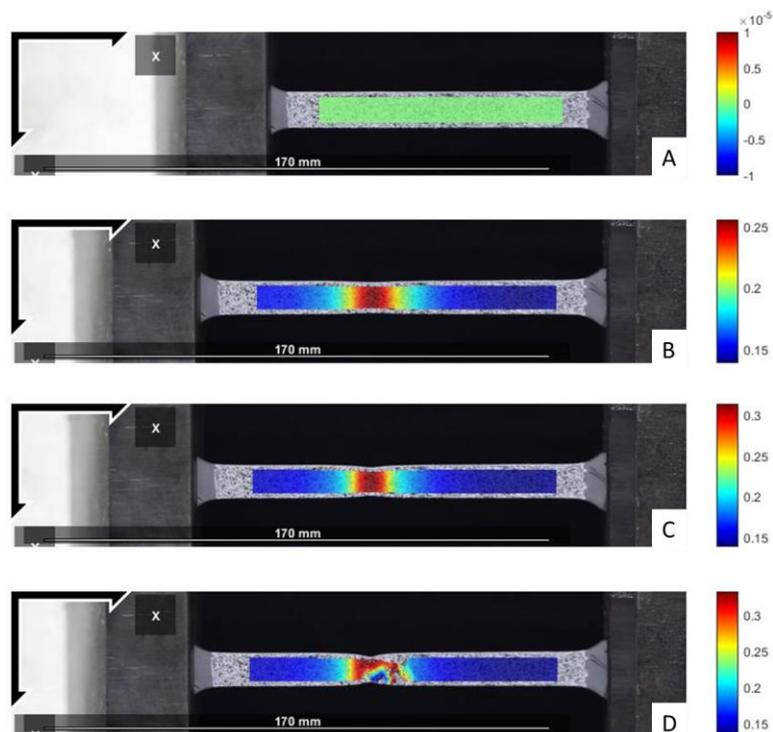


Figura 16: Resultados de la correlación de imágenes obtenidas por el software Ncorr

Como se puede ver en la figura 16 d), cuando la probeta ya entro en fase final de encuellamiento y finalmente fractura, el programa Ncorr no puede hacer un correcto análisis. Esto se da porque las deformaciones en ese instante superan la resolución que posee el programa por lo que para el propósito de estudio se va a tomar solo los resultados hasta el tiempo en que la probeta alcanza el esfuerzo ultimo de fluencia durante el ensayo de tracción. Para poder extraer los datos de las deformaciones se utilizó un programa hecho en Matlab. El programa permite acceder a las matrices de deformaciones generadas por el Ncorr y es este caso, devuelve como resultado un archivo de Excel que contiene la deformación máxima de cada imagen. Con esos valores se realizaron las gráficas que se muestran en la figura 17; donde se compara los resultados de cada ensayo con el resultado de la máquina de tracción. Dado a que los ensayos de tracción fueron realizados a una misma velocidad de desplazamiento de los pistones de la máquina, la curva deformación vs tiempo es una línea recta. Por otro lado, las curvas obtenidas por el DIC tienen una tendencia lineal con una dispersión promedio de los datos de 0.975.

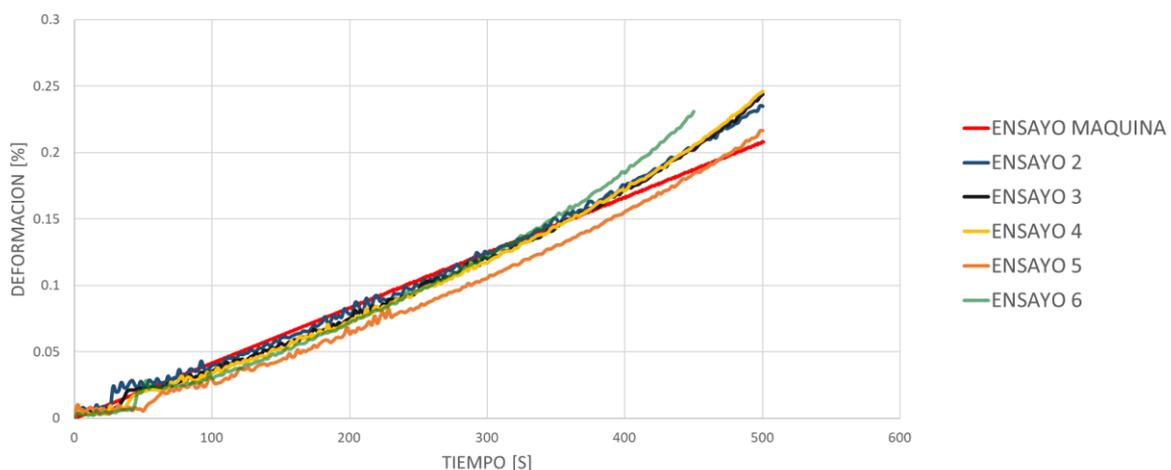


Figura 17: Gráfica de la deformación en función del tiempo de los ensayos de calibración

La velocidad de deformación de las probetas dada por la máquina, así como la del Ncorr y el error porcentual obtenido entre los 2 métodos se muestra en la tabla 4. La velocidad de deformación real (dada por la máquina de ensayos universales) de las probetas es de 0.000416 [%/s], mientras que la velocidad promedio de los 5 ensayos realizados es de 0.000460 [%/s] con una desviación estándar de 0.0000278 [%/s]. El promedio del error experimental obtenido entre los resultados de la máquina de tracción y los resultados del DIC es del 11%. Con esos resultados se demuestra que la técnica del DIC tiene una alta precisión por lo que esta técnica puede ser utilizada para realizar los demás análisis.

Tabla 4: Velocidad de deformación de las probetas de los ensayos de calibración obtenida por el Ncorr y por la máquina de ensayos universales

No. de Ensayo	Velocidad de carga [%/S]	ERROR
MAQUINA	4.16E-04	0%
2	4.51E-04	9%
3	4.62E-04	11%
4	4.70E-04	13%
5	4.26E-04	3%
6	4.90E-04	18%

Fractura de almodón de maíz

SEM

Para visualizar forma de los gránulos de la maicena, se tomaron fotografías con ayuda de un Microscopio electrónico de barrido Jeol IT300 (SEM). En la figura 18 se puede observar los gránulos de maicena sin ser mezclada con agua, a diferentes magnificaciones. Los gránulos tienen una forma predominante esférica (figura 18 a)). Algunos gránulos presentan caras planas y algunas imperfecciones como se puede visualizar mejor en la figura 18 b).

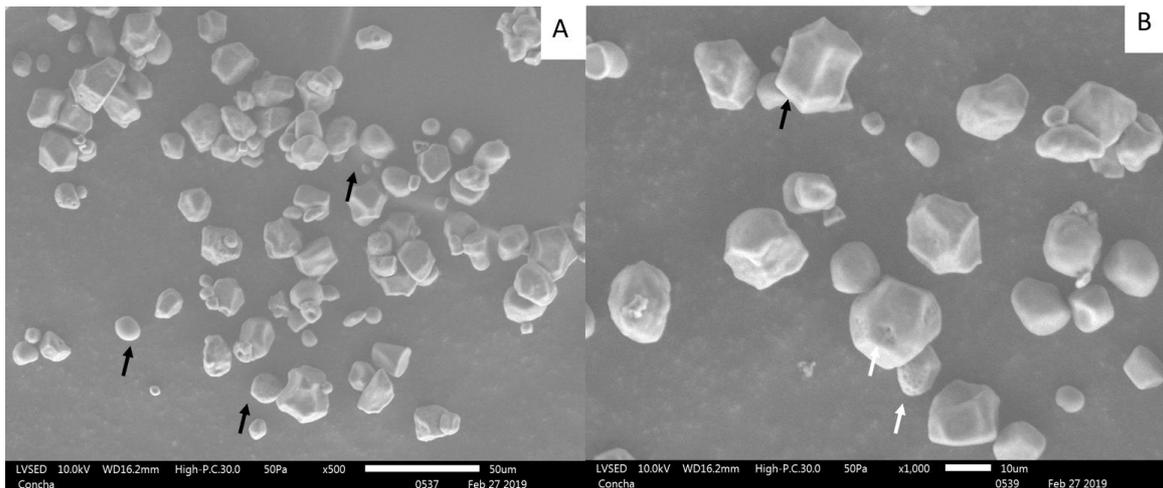


Figura 18: Fotos de los gránulos de maicena tonados por SEM con una magnificación de a) 250x, b) 500x y c) 1000x

En la figura 19 se muestran fotos tomadas con SEM después del proceso de mezclar maicena con agua y secarla completamente bajo las mismas condiciones a las que se va a realizar el análisis del agrietamiento de las muestras de maicena. Como se puede ver la morfología de los gránulos no ha cambiado, lo que se observa es que por efectos del agua los gránulos se encuentran aglomerados. En la figura 20 a), foto de una columna de maicena después del proceso de secado, se puede observar que hay pequeñas marcas verticales que atraviesan toda la columna; esto permite ver como la propagación de las grietas es hacia abajo. En la figura 20 b), se pueden visualizar algunos poros que quedaron después del proceso de secado de la mezcla. En este caso, no se puede determinar el lugar exacto en donde comenzó a nuclear la fractura debido a la dificultad de que tiene observar este tipo de materiales en el SEM. Debido a que la morfología de los gránulos no varía, se determinó que la maicena si se puede utilizar como material base para recrear los patrones de agrietamiento tipo *mud crack*.

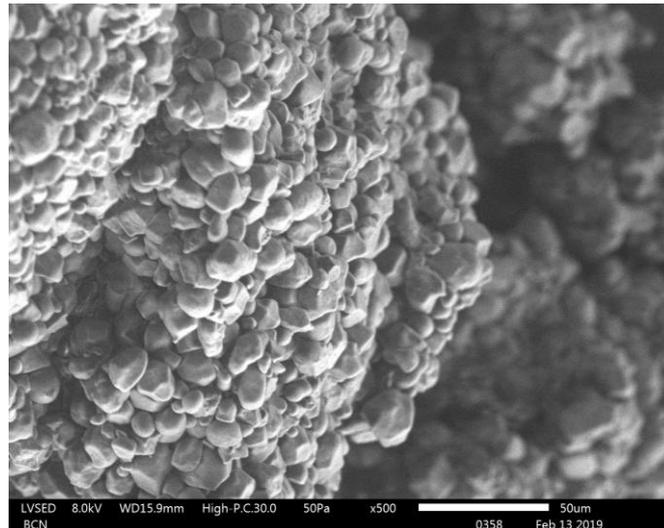


Figura 19: Aglomeración de gránulos de maicena después del proceso de mezcla y evaporación del agua a una temperatura menor de 65°C para evitar gelatinización.

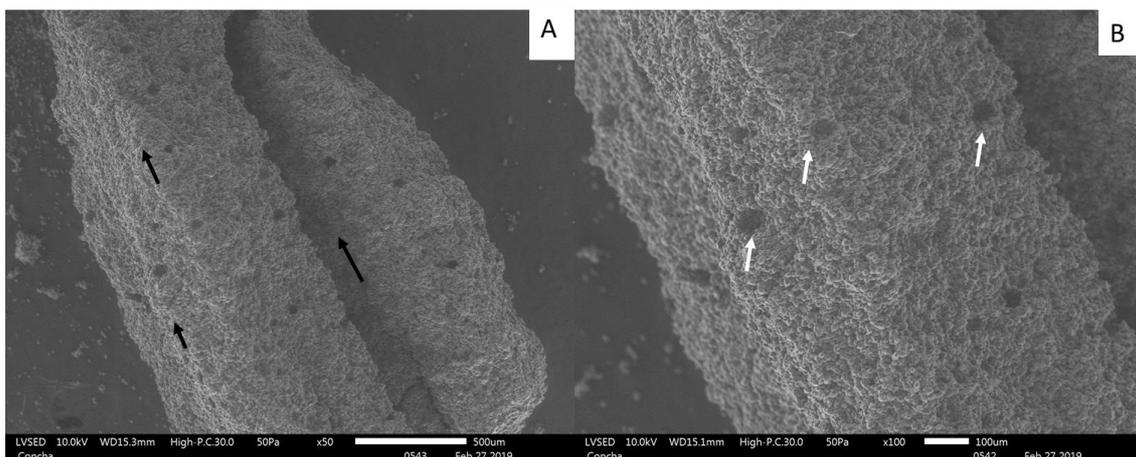


Figura 20: Fotos de SEM de una columna de maicena después de agrietarse por un proceso de secado a) 50x b) 100x

Patrones de Agrietamiento

Como resultados de los ensayos de agrietamiento, se observa que la grieta principal nuclea en los extremos del concentrador de esfuerzos y de propaga de forma lineal tanto en la superficie como en el fondo del material. En la figura 21, se muestran 3 ensayos de agrietamiento realizados con el objetivo de determinar los patrones de fractura. Se realizó una transformación de las imágenes de los patrones de agrietamiento a imágenes binarias

con el objetivo de visualizar de forma más clara las grietas, como se muestra en la figura 22. Basándose en la separación de cada una de las grietas, se puede observar que las primeras son las que nuclearon en los extremos del concentrador de esfuerzos (figura 22, flechas negras). A continuación, aparecen las grietas que se encuentran a 90° con respecto a la grieta principal; estas se encuentran marcadas con flechas tomates en la figura 22. Finalmente, comienza a agrietarse de forma más uniforme todo el material. Estas últimas grietas en formarse generan arreglos de grietas con forma de hexágonos, con ángulos de intersección entre grietas de 60° o 120° ; eso se puede visualizar mejor en la figura 21.

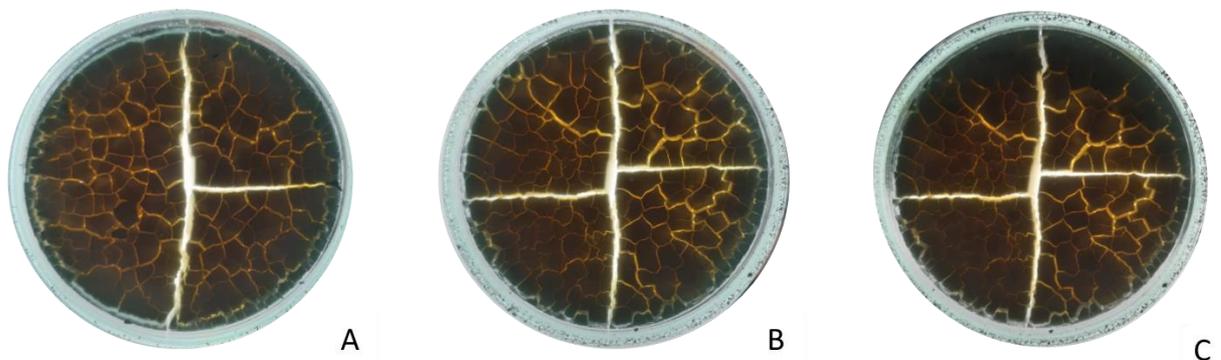


Figura 21: Patrones de fractura de una mezcla de maicena y agua después de un proceso de deshidratación.

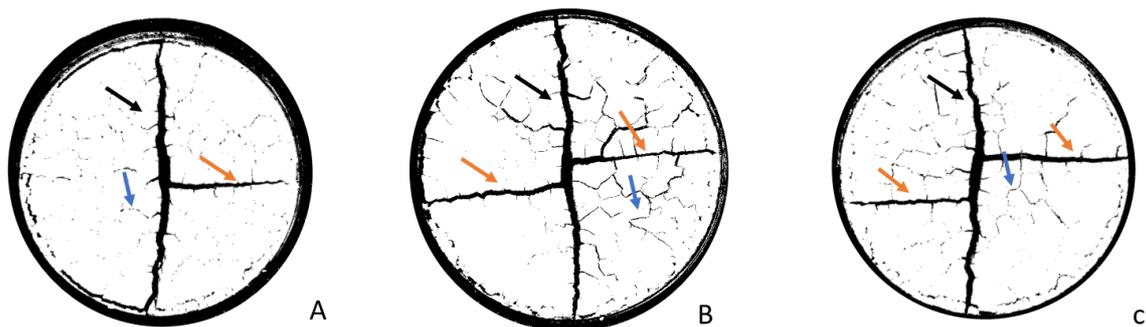


Figura 22: Imágenes binarias de los patrones de fractura donde se observan: Primeras grietas (flechas negras) Segundas grietas (flechas tomates) Grietas finales (flechas azules)

Deshidratación

Durante el proceso de secado, se asume que la temperatura de la cama caliente es la misma temperatura que la mezcla de maicena y agua y que lo único que se pierde en este proceso es agua. En la figura 23 se muestra la gráfica del peso de cada una de las muestras en función al tiempo de secado. Como se puede observar, en el proceso de secado existe bastante ruido en los datos adquiridos, esto se debe a que los datos de la balanza no tienen una buena precisión. Entre los principales factores que afectan las mediciones de peso tenemos: la balanza no se encuentra calibrada, la temperatura de la cama caliente afecta a los componentes físicos de la balanza por lo tanto el valor dado no es el correcto. Además, cuando se pesan muestras cuya temperatura es mayor a la del ambiente, se generan corrientes de aire que pueden afectar a las mediciones de esta. Por otro lado, el campo magnético generado por la cama caliente puede afectar la precisión del controlador digital de la balanza.

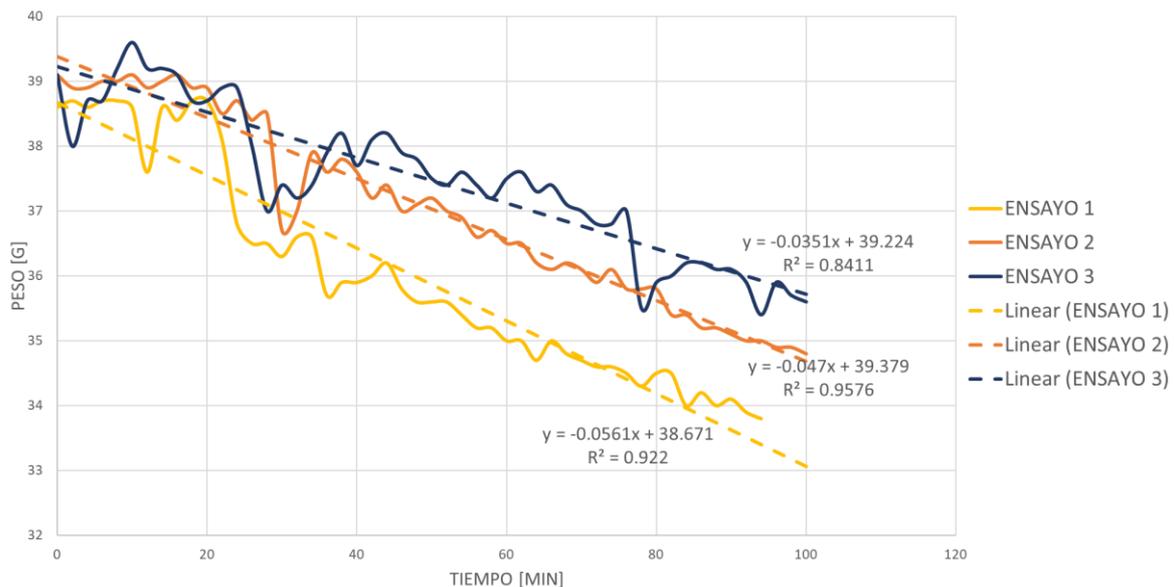


Figura 23: Gráfica del peso [g] en función del tiempo [min] durante el proceso de deshidratación de las muestras de maicena y agua

Tomando en cuenta lo mencionado con respecto a la variación de los datos, se obtuvo que la dispersión promedio de los datos para los 3 ensayos de agrietamiento es de 0.906. Además, la tasa de deshidratación promedio, considerada a partir de peso en función al tiempo, es de -0.046 ± 0.0105 [g/min]. En la figura 24 se muestra una gráfica del porcentaje de humedad en función del tiempo para cada uno de los ensayos. Al hacer una comparación entre la figura 23 y 24, se puede ver que la tendencia de los datos es la misma, eso se debe a que la humedad depende solo de la cantidad de agua perdida en la muestra que en este caso es la misma con respecto al peso.

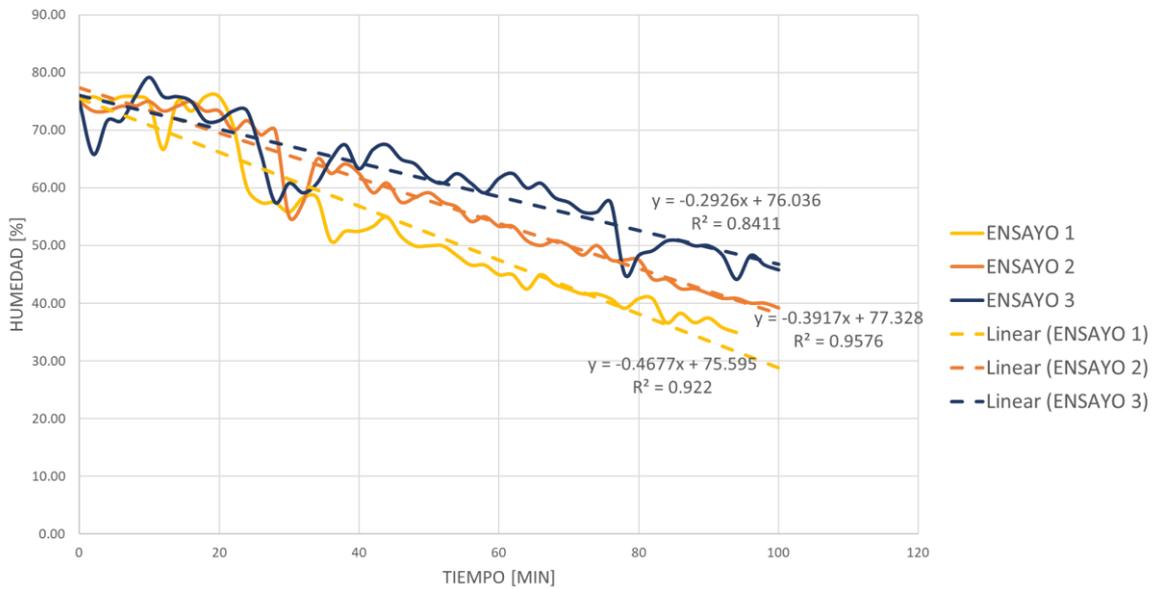


Figura 24: Gráfica del porcentaje de humedad con respecto al tiempo [min] para los ensayos de agrietamiento de una mezcla de maicena y agua

Tabla 5: Datos de la humedad obtenida a partir del peso dado por la balanza durante el proceso de secado para cada uno de los ensayos de agrietamiento y cálculo del error experimental con respecto a la humedad, al momento de inducir el concentrador de esfuerzos, obtenida a partir de la medición del peso con una balanza que no ha sido afectada por la temperatura del ensayo de agrietamiento

No. de Ensayo	Humedad Inicial [%]	Humedad al Inducir el Concentrador de Esfuerzos [%]	Humedad dada por la balanza [%]	Humedad Antes de la fractura [%]	Error Humedad al Inducir la grieta [%]
1	75	68.83	62.53	63.6	9.15
2	75	68.83	72.28	68.5	5.01
3	75	68.83	65.23	64.33	5.23
Promedio				65.5	6.47

Como se puede ver en la tabla 5, las muestras tenían un porcentaje de humedad real de 68.83 % al momento de inducir el concentrador de esfuerzos. Con respecto a la humedad obtenida a partir de la balanza colocada durante el proceso de secado, se obtuvo un error promedio del 6.47 %. El porcentaje de error se lo debe tomar en cuenta para poder determinar con mejor precisión el valor de la humedad al instante de la fractura, para los ensayos realizados, se obtuvo que la humedad antes de la fractura es de 65.5 ± 2.64 %.

Deformación antes de la fractura.

La deformación que sufren las muestras de maicena y agua durante el proceso de secado se determinó con ayuda del software Ncorr. Todos los parámetros introducidos en el programa para obtener un correcto análisis se muestran en el anexo 2. Las imágenes de referencia para cada uno de los ensayos se muestran en la figura 25 y las imágenes que se

determinó que son tomadas un instante antes de la fractura se muestran en la figura 26. Cabe recalcar que las imágenes antes de la fractura son subjetivas debido a que no existe un parámetro numérico que permita determinar en qué instante el material comenzó a agrietarse y depende netamente del criterio de la persona que visualiza las imágenes.



Figura 25: Imágenes de referencia introducidas en el Ncorr para cada ensayo de agrietamiento de muestras de almidón de maíz y agua

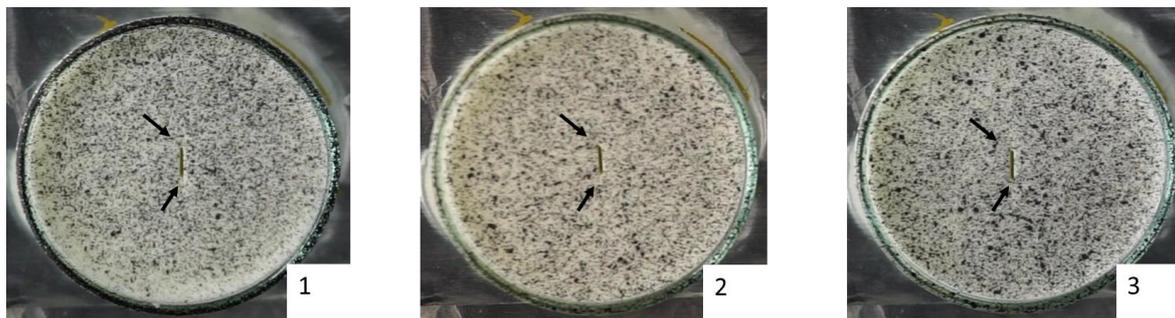


Figura 26: Imágenes antes de la fractura tomadas para determinar la deformación en los ensayos de agrietamientos

Como resultado del análisis de imagen se obtuvo una serie de imágenes en escala de colores donde se puede identificar que zonas del material sufre la mayor deformación por efecto del secado y por el concentrador de esfuerzos inducido. En la figura 27, se puede ver como la deformación, en dirección al eje x, se concentra en los extremos del concentrador de esfuerzos en todos los ensayos y que la deformación en la parte alejada del concentrador de esfuerzos es uniforme.

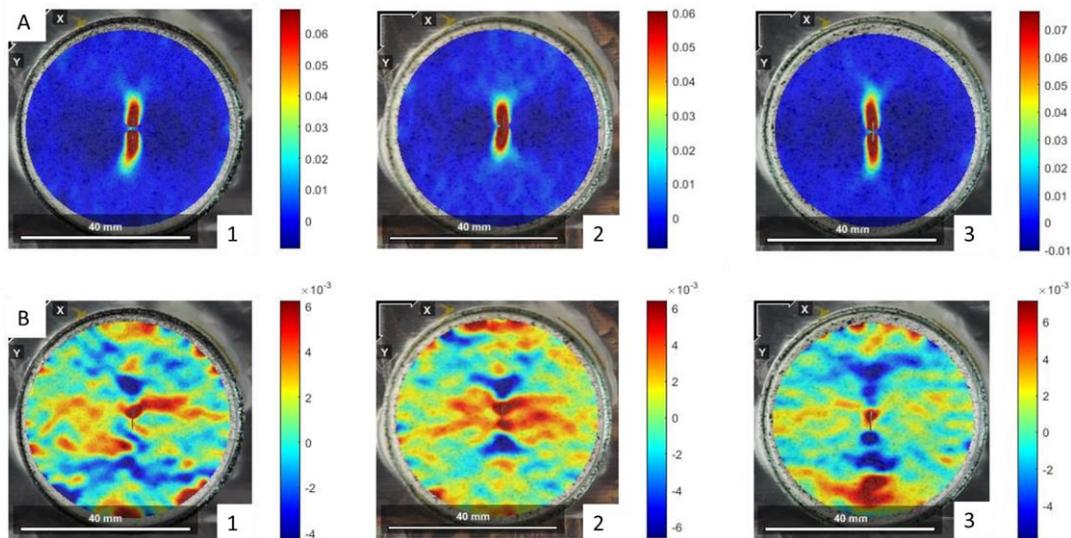


Figura 27: Análisis de imagen antes de la fractura del material en los 3 ensayos de agrietamiento de muestras de maicena y agua. A) exx B) eyy

Los resultados de deformación en un instante antes de la fractura, se tomó a partir de las imágenes de la figura 27 para cada ensayo. En la tabla 6 se reportan los resultados de las deformaciones en los diferentes ejes para cada ensayo. La deformación promedio de los 3 ensayos en el eje x es de 0.1037 ± 0.0046 [%]. En comparación a las deformaciones obtenidas en los ejes y xy, se puede ver que la deformación en x es predominante debido a que el concentrador de esfuerzos tiene esa orientación. En el anexo 3 se muestra cómo se propagan las grietas a lo largo del concentrador de esfuerzos y como se forman nuevas grietas en otras direcciones.

Tabla 6: Deformación de las muestras de maicena y agua un instante antes de la fractura.

No. De Ensayo	exx [%]	eyy [%]	exy [%]
1	0,1028	0,012	0,0193
2	0,0997	0,0108	0,0114
3	0,1089	0,0125	0,014
Promedio	0,1037	0,0118	0,0149

Compresión

Para determinar el módulo de elasticidad de cada una de las probetas se realizó la gráfica esfuerzo vs deformación para cada ensayo. En la figura 28 se muestra la gráfica de los módulos de elasticidad en función del porcentaje de humedad para cada una de las muestras. Como se puede observar, en el rango de 62.5 % a 63.5 %, el módulo de elasticidad no presenta una tendencia, pero conforme aumenta el porcentaje de humedad, el módulo de elasticidad presenta una tendencia lineal creciente.

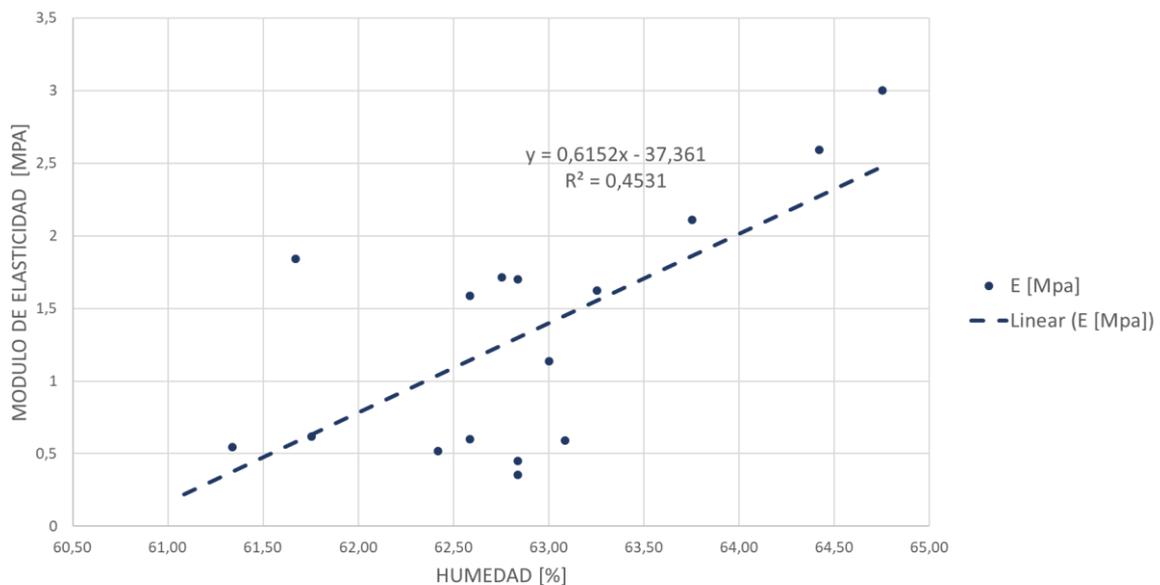


Figura 28: Gráfica del Módulo de Elasticidad en función del Tiempo para los ensayos de compresión

Para obtener el módulo de elasticidad a la misma humedad a la que los ensayos de agrietamiento comienzan a fracturar se tomó solo los puntos, de la figura 28, de los ensayos equivalentes a un porcentaje de humedad de 63.50% a 65%. En la figura 29 se muestra la tendencia del módulo de elasticidad dentro del rango en el que el porcentaje de humedad de los cilindros de los ensayos de compresión es similar a los ensayos de agrietamiento. Con el promedio del porcentaje de humedad antes de la fractura mostrado en la tabla 5 y con la

ecuación de la tendencia de la figura 29, se obtiene que el módulo de elasticidad que tiene la mezcla de maicena y agua antes de agrietarse es de 3.74 [MPa].

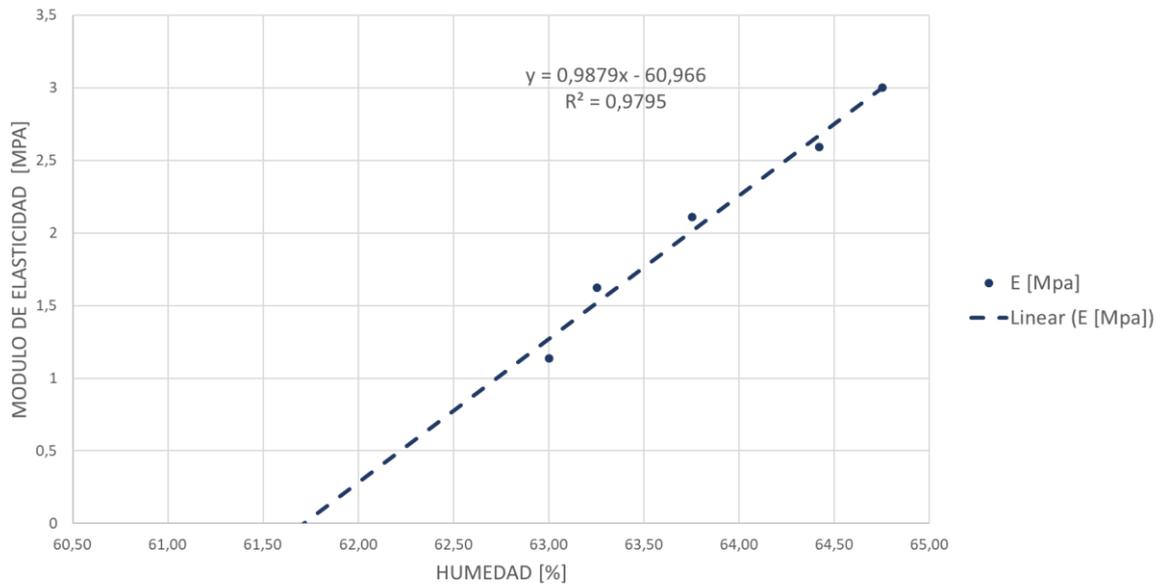


Figura 29: Módulo de Elasticidad en función del Tiempo de 63% a 65% de humedad

Modelo Matemático

Para determinar el esfuerzo que sufre el material antes de la fractura se realizó un análisis haciendo la suposición de que la maicena tiene un comportamiento elástico con deformaciones finitas. Podría hacerse un análisis más aproximado considerando un material viscoelástico, pero el análisis del comportamiento está limitado a evaluar las propiedades del material, por lo que la aproximación usada es un modelo elástico de deformaciones finitas. Se utilizó la ecuación del segundo tensor de Piola Kirchoff (tensor simétrico) que permite plantear un problema de un material elástico sobre una configuración inicial. La ecuación matricial es:

$$\sigma = \sigma_0 + E * \epsilon$$

Donde:

σ_0 : Second Piola-Kirchhoff stress in the reference configuration

E : Modulo de elasticidad

ϵ : deformaciones por Green – Lagrangian

En este análisis no existe un esfuerzo en la configuración de referencia, por lo tanto, ese valor dentro de la ecuación es 0, el módulo de elasticidad es 3.74 [MPa] a un porcentaje de humedad de la muestra de 65.5% y el valor promedio de las deformaciones en todas las direcciones se muestra en la tabla 6. El esfuerzo que siente el material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Tensor de esfuerzos del material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento

Dirección	X [MPa]	Y [MPa]	XY [MPa]
σ	0.3878	0.0441	0.0557

Costos del Proyecto

Para determinar los costos del proyecto se hicieron 2 análisis. El primer análisis, que se muestra en la tabla 8, incluye todos los materiales que se adquirieron solo para la elaboración del proyecto, no toma en cuenta el costo de utilización de máquinas ni sueldo del operario. Con el primer análisis, el costo total para elaborar todos los ensayos fue de \$167.51. En el segundo análisis, mostrado en la tabla 9, se muestra el costo total del proyecto si se deseara realizar este experimento adquiriendo todos los equipos e insumos necesarios y si los ensayos

de tracción o compresión se realizara en otra institución. En este segundo análisis, se obtuvo que el costo total de los experimentos es de \$4425.33.

Tabla 8: Presupuesto del proyecto sin incluir costos de máquinas

Presupuesto			
Cantidad	Detalle	Precio Unitario	Precio Total
7	Probetas de Acero A36	\$ 8.00	\$ 56.00
2	Pintura Blanca	\$ 2.50	\$ 5.00
4	Pintura Negra	\$ 2.50	\$ 10.00
4	Petri Pequeño	\$ 2.50	\$ 10.00
4	Petri Grande	\$ 5.55	\$ 22.20
24	Maicena	\$ 1.70	\$ 40.80
1	Plástico	\$ 3.00	\$ 3.00
6	Cinta adhesiva	\$ 1.40	\$ 8.40
1	PVC	\$ 9.11	\$ 9.11
1	Vaselina	\$ 3.00	\$ 3.00
			167.51

Tabla 9: Presupuesto del proyecto incluido costo de operación de máquinas y adquisición de todos los equipos

Presupuesto			
Cantidad	Detalle	Precio Unitario	Precio Total
1	Cámara + Trípode	\$ 3 250.00	\$ 3 250.00
7	Probetas de Acero A36	\$ 8.00	\$ 56.00
2	Pintura Blanca	\$ 2.50	\$ 5.00
4	Pintura Negra	\$ 2.50	\$ 10.00
2	Focos	\$ 8.68	\$ 17.36
1	Cama Caliente	\$ 19.99	\$ 19.99
4	Petri Pequeño	\$ 2.50	\$ 10.00
4	Petri Grande	\$ 5.55	\$ 22.20
24	Maicena	\$ 1.70	\$ 40.80

1	Arduino	\$ 57.49	\$ 57.49
1	Relay	\$ 13.99	\$ 13.99
1	Fuente de 12v y 10 ^a	\$ 8.99	\$ 8.99
1	Plástico	\$ 3.00	\$ 3.00
6	Cinta adhesiva	\$ 1.40	\$ 8.40
1	PVC	\$ 9.11	\$ 9.11
1	Vaselina	\$ 3.00	\$ 3.00
22	Ensayos de Compresión	\$ 20.00	\$ 440.00
6	Ensayos de Tracción	\$ 25.00	\$ 150.00
3	SEM	\$ 60.00	\$ 180.00
60	Horno (60 h)	\$ 2.00	\$ 120.00
			\$ 4 425.33

CONCLUSIONES

La técnica de Correlación Digital de Imágenes, utilizada para determinar deformaciones, presenta un porcentaje de error del 11% en los ensayos de calibración, este valor es considerado como un error muy bajo; por esta razón, se puede aplicar esta técnica en los ensayos de agrietamiento y tener certeza que los resultados obtenidos tienen un porcentaje de error similar al de los ensayos de calibración. El porcentaje de error que se obtiene del N_{corr} depende netamente de la forma en la que se adquieren los datos para el análisis; es por esto es necesario: realizar un speckle pattern uniforme a lo largo de toda la probeta, tener una buena resolución de las imágenes, evitar hacer sombra dentro del área de análisis, evitar dar luz directa a las probetas para porque se podrían perder puntos al momento de tomar el video y lo más importante es evitar mover la probeta cuando se está realizando la toma del video.

La maicena no se debe curar a temperaturas superiores a los 65 °C porque el almidón comienza a gelatinizar convirtiéndose en un material con propiedades completamente diferentes. Con las imágenes realizadas con SEM se pudo constatar que la morfología de los gánalos de maicena después del proceso de secado no cambia, solo se aglomeran en arreglos columnares (característica propia de mud crack); por esta razón, se adjudica que el peso perdido durante el proceso de secado es solo evaporación de agua.

De los ensayos de agrietamiento se determinó que las muestras fracturan cuando tienen un porcentaje de humedad promedio del 65.5%. Al ser un material reológico, la maicena no tiene un comportamiento completamente lineal del módulo de elasticidad respecto al porcentaje de humedad, pero si se realiza un análisis entre 63.5% y 65.5% se observa un

comportamiento parcialmente lineal, lo que permitió determinar que el módulo de elasticidad es 3.74 [MPa].

Por efecto del proceso de deshidratación de las mezclas de maicena y agua se observa que las grietas principales nuclean en los extremos del concentrador de esfuerzos y se extienden a lo largo y profundidad del material. La deformación máxima que sufre el material antes de agrietarse es de 0.1037 [%]. Las grietas secundarias, aparecen a 90° respecto a la orientación del concentrador de esfuerzos. Finalmente, el material se agrieta formando hexágonos uniformes a lo largo de todo el material (característica propia de *mud crack*).

El segundo tensor de Piola-Kirchhoff permite determinar el esfuerzo, en todas las direcciones, que sufre el material antes de fracturar en los ensayos de agrietamiento considerando a la maicena como un material elástico con deformaciones finitas. Para este análisis, se utilizó los valores de deformaciones obtenidas de la correlación de imágenes y el módulo de elasticidad determinado en función al porcentaje de humedad de la muestra; con esos datos se obtuvo que el esfuerzo en las direcciones x , y , y xy son: 0.3878, 0.0441, 0.0557 [MPa] respectivamente.

RECOMENDACIONES

Realizar los ensayos de calibración con diferentes posiciones de las luces utilizando reflectores similares a los que se utilizan para hacer grabaciones de películas (que permiten obtener una luz difusa blanca), para tratar de disminuir el error que tiene la técnica de DIC.

Mejorar la forma de medir la pérdida de peso en función del tiempo en los ensayos de agrietamiento utilizando una balanza que tenga una fuente de calor propia o a su vez, comprobar el error de la balanza realizando ensayos de agrietamiento sin la fuente de calor.

El proceso de fractura se acelera en función a la forma y tamaño del concentrador de esfuerzos; por esta razón, se recomienda hacer ensayos de fractura con diferentes tamaños de concentradores de esfuerzo para entender mejor el efecto que tiene el concentrador de esfuerzos en la fractura.

Para garantizar la linealidad que existe entre el módulo de elasticidad y el porcentaje de humedad, se sugiere realizar más ensayos de compresión de cilindros que tengan un porcentaje de humedad que varíe entre 63.5% y 65%. Además, fabricar un embolo que tenga el mismo tamaño que la parte interna de los moldes de los cilindros de maicena y agua para evitar que se rompan al momento de su extracción.

Para obtener un correcto *speckle pattern* se aconseja limpiar la boquilla del aerosol de pintura antes de cada uso, evitar realizar este proceso cuando la pintura está por terminarse y aplicar presión constante al aerosol durante todo el proceso de salpicadura.

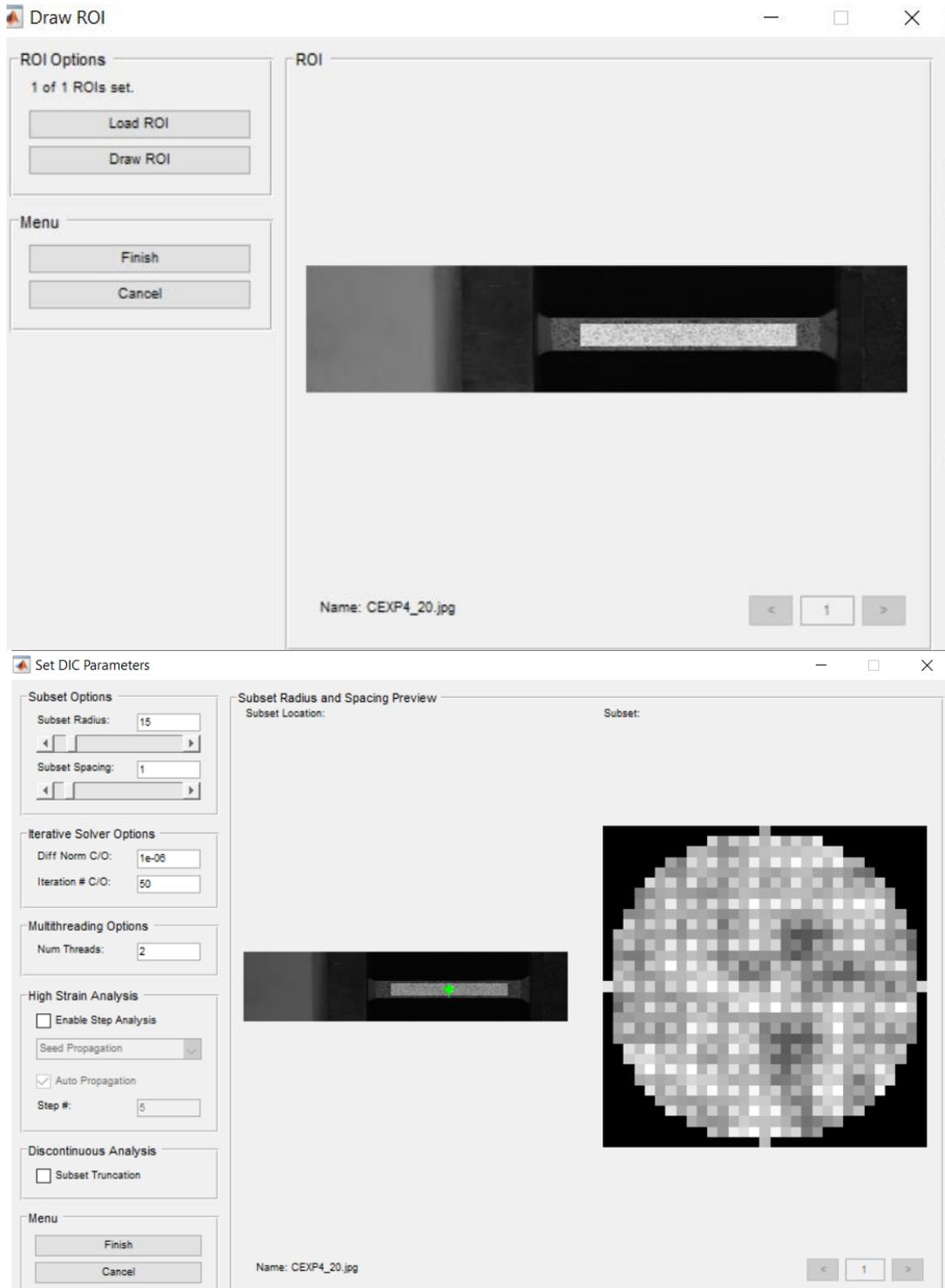
Se recomienda realizar los ensayos de agrietamiento con muestras de maicena y agua con un espesor de capa pequeño, 1 cm aproximadamente, para garantizar tener condiciones de esfuerzo plano.

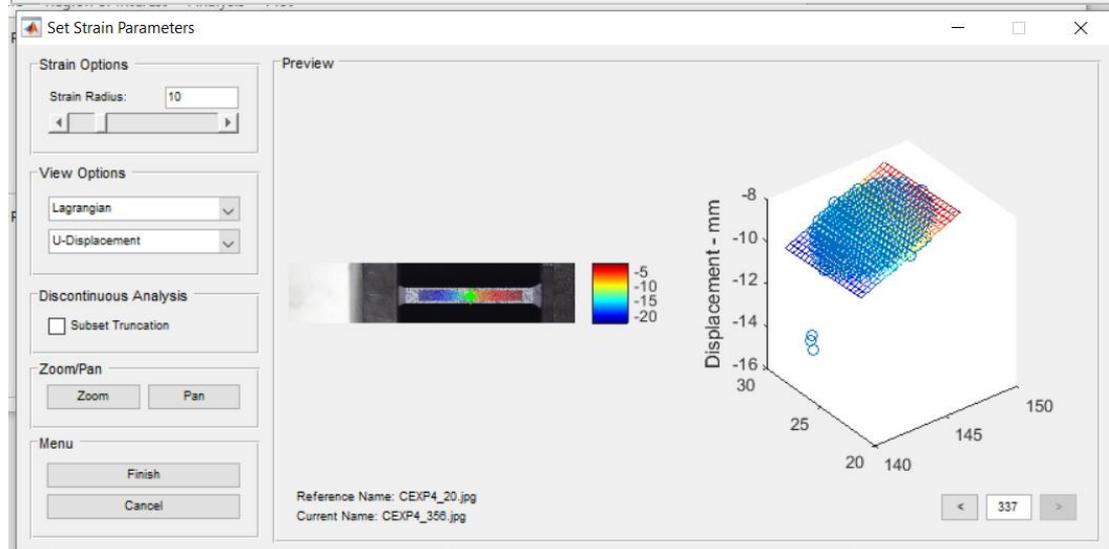
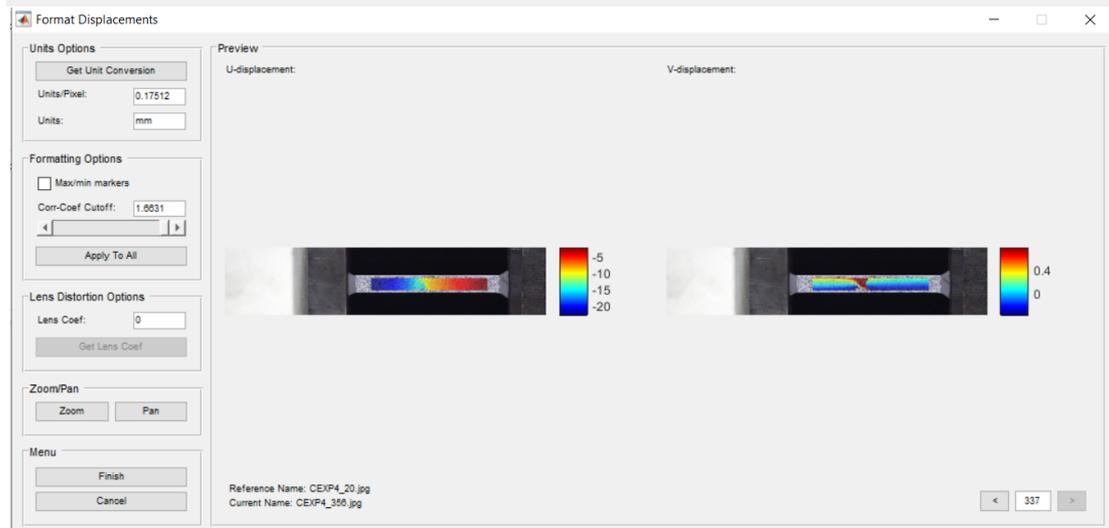
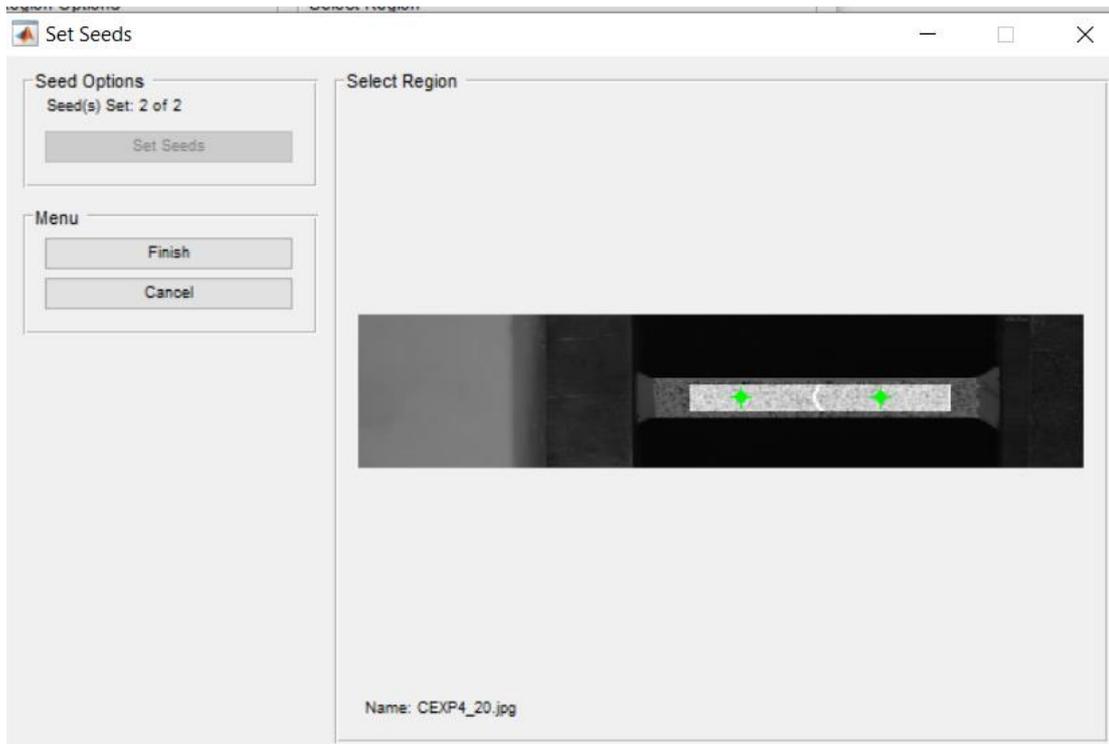
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Budynas, R., & Nesbett, J. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10ma ed.). McGraw Hill.
- Callister, W., & Rethwisch, D. (1940). *Materials Science and Engineering: an Introduction* (8va ed.). WILEY.
- Fayyad, T. M., & Lees, J. M. (2014). Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture. *Procedia Materials Science*, 3, 1585–1590.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>
- Groisman, A., & Kaplan, E. (1994). An Experimental Study of Cracking Induced by Desiccation .
A n Experimental Study of Cracking Induced by Desiccation .
- Jadhav, A., Padture, N. P., Wu, F., Jordan, E. H., & Gell, M. (2005). Thick ceramic thermal barrier coatings with high durability deposited using solution-precursor plasma spray, 405, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.023>
- Julien, R. (2009). Digital Image Correlation and Fracture : An Advanced Technique for Estimating Stress Intensity Factors of 2D and 3D Cracks St ´ To cite this version : Digital Image Correlation and Fracture : An Advanced Technique for Estimating Stress Intensity Factors o.
- Khatun, T., Dutta, T., & Tarafdar, S. (2015). Topology of desiccation crack patterns in clay and invariance of crack interface area with thickness. *European Physical Journal E*, 38(8). <https://doi.org/10.1140/epje/i2015-15083-6>
- MatWeb. (n.d.). ASTM A36 Steel, plate. Retrieved May 12, 2019, from <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>

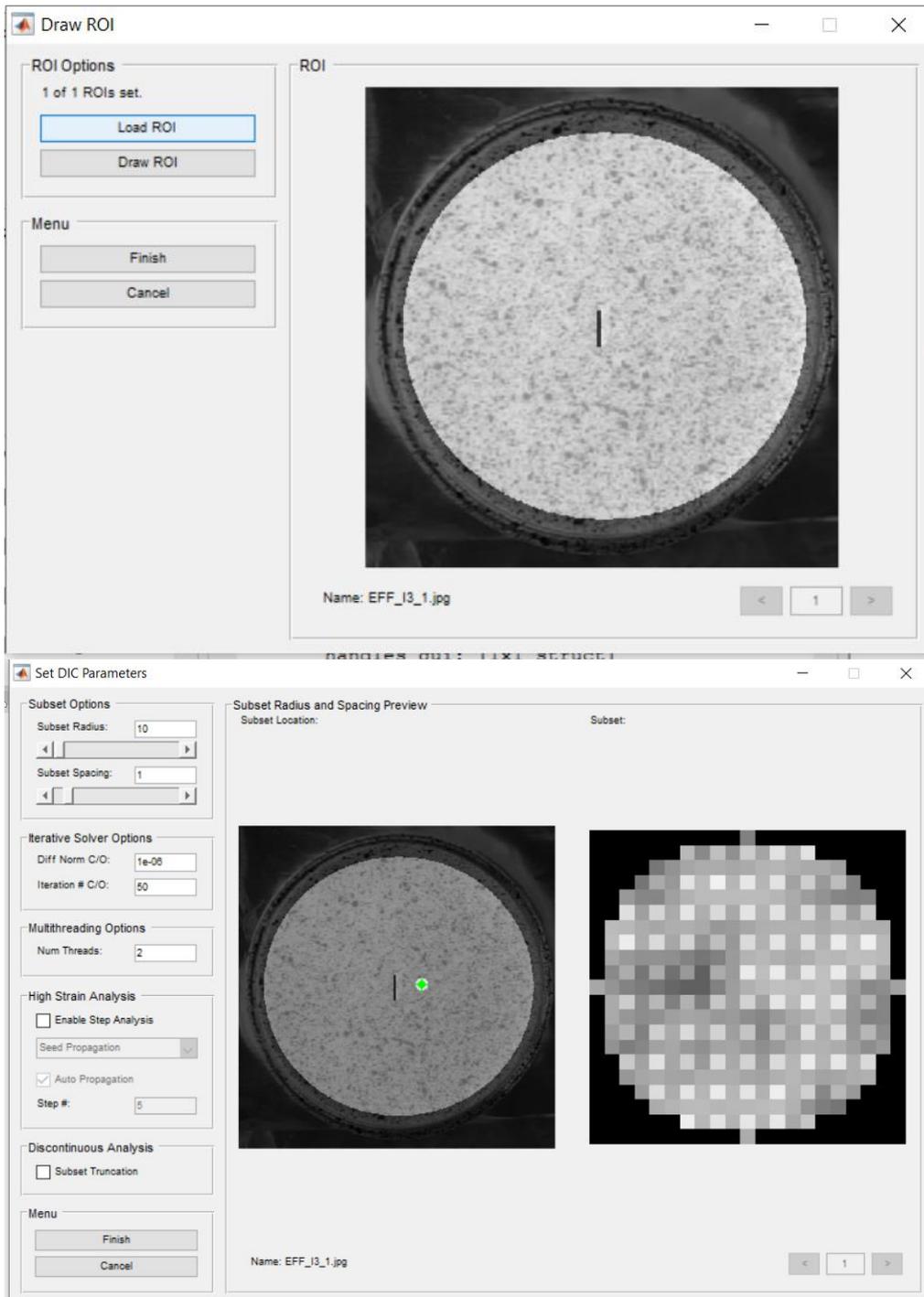
- Mccormick, N. (2012). Digital image correlation for structural measurements, *165*, 185.
- Nishimoto, A., Mizuguchi, T., & Kitsunezaki, S. (2007). Numerical study of drying process and columnar fracture process in granule-water mixtures, 32–34.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.016102>
- Peron, H., Laloui, L., Hu, L. B., & Hueckel, T. (2013). Formation of drying crack patterns in soils: A deterministic approach. *Acta Geotechnica*, *8*(2), 215–221.
<https://doi.org/10.1007/s11440-012-0184-5>
- Schmeink, A., Goehring, L., & Hemmerle, A. (2017). Fracture of a model cohesive granular material. *Soft Matter*, *13*(5), 1040–1047. <https://doi.org/10.1039/c6sm02600a>
- Stutelberg, J., Wagner, M. J., Kyle, R. N., Ritchie, R., Americas, L., Daniels, A., & Washington, C. (2017). 2017 BOARD OF DIRECTORS CORN REFINERS.
- TAMARON. (2019). SP AF 60mm F/2.0 Di II LD [IF] Macro 1:1. Retrieved May 9, 2019, from <https://www.tamron.eu/es/objetivos/sp-af-60mm-f20-di-ii-ld-if-macro-11/>
- Tang, C.-S., Shi, B., Cui, Y.-J., Liu, C., & Gu, K. (2012). Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, *49*(9), 1088–1101. <https://doi.org/10.1139/t2012-067>
- University of Virginia. (2013). High Temperature Coatings. Retrieved May 27, 2019, from <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/high-temp.html>
- Weinberger, R. (1999). Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments, *21*, 379–386.
- Weinberger, R., Survey, G., & Street, M. I. (2001). Evolution of polygonal patterns in stratified mud during desiccation : The role of flaw distribution and layer boundaries, *(1)*, 20–31.

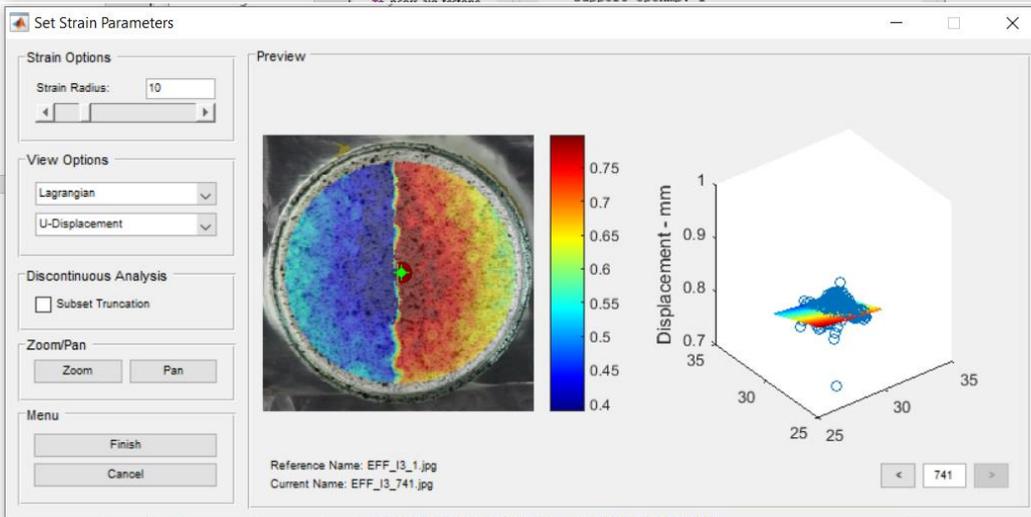
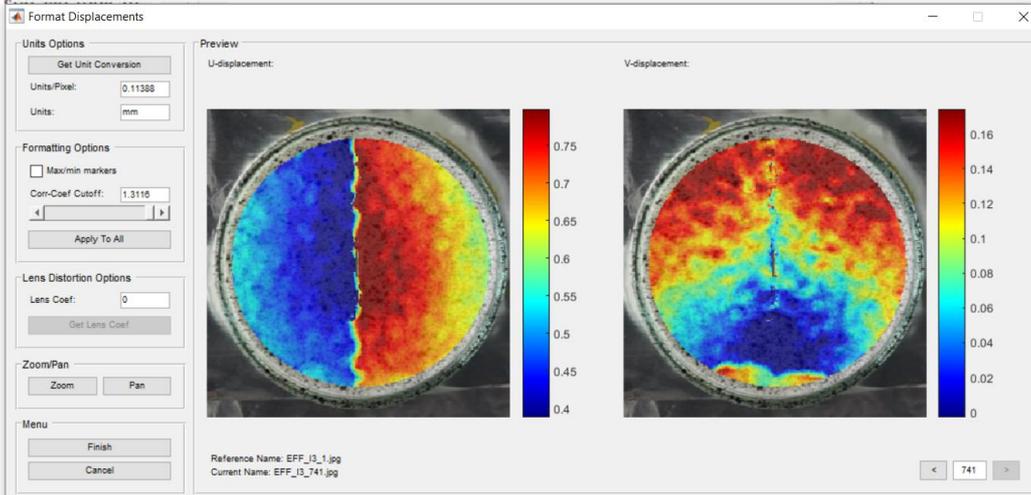
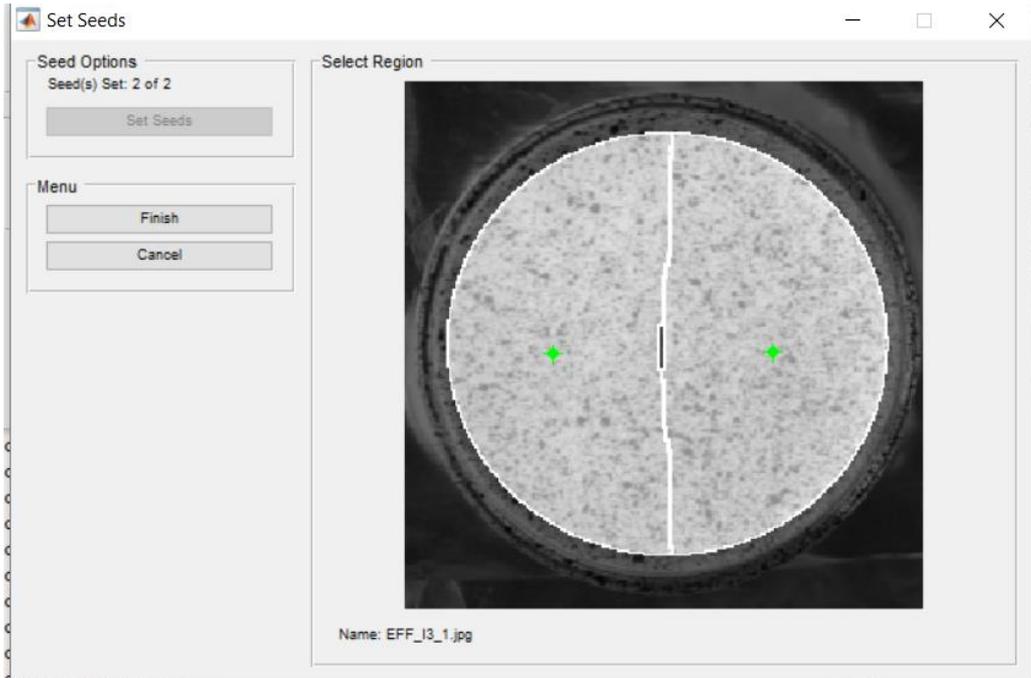
ANEXO 1: PARAMETROS COLOCADOS EN EL SOFTWARE PARA HACER EL ANALISIS DE IMAGEN DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACION





ANEXO 2: PARAMETROS COLOCADOS EN EL SOFTWARE PARA HACER EL ANALISIS DE IMAGEN DE LOS ENSAYOS DE AGRIETAMIENTOS DE MUESTRAS DE MAICENA Y AGUA





**ANEXO 3: EVOLUCION DE LAS GRIETAS DURANTE EL PROCESO DE SECADO
DE MUESTRAS DE MAICENA Y AGUA**

