

# “Soluciones sustentables para la estabilización de suelos: evaluación del impacto de Duraflex en la resistencia y la porosidad”

Naveed Khan\*, Nigel Shrive

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Calgary, 2500 University Drive NW, Calgary, Alberta, T2N 1N4, Canadá

\*Autor correspondiente

Dirección de correo electrónico: naveed.khan@ucalgary.ca (Naveed Khan),  
ngshrive@ucalgary.ca (Nigel Shrive)

## **Resumen**

Se evaluó la posibilidad de mejorar las propiedades de ingeniería de una arcilla limosa de Calgary, Alberta. Se probaron 144 muestras de suelo arcilloso limoso (S), arcilla limosa más cemento (SC) y arcilla limosa más cemento más aditivo Duraflex (SCD) para determinar la resistencia a la compresión sin confinamiento ( $q_u$  (UCS)) o la resistencia a la tracción por hendidura (STS).

Se utilizaron dos condiciones de curado (una sala de curado (100% HR) y el entorno de laboratorio) para diferentes duraciones de curado (7, 14, 28 días y 10 meses). Los resultados indicaron que las muestras de 10 meses curadas en laboratorio con aditivo Duraflex (DFI) fueron estadísticamente más fuertes que las muestras SC y S. Se observaron variaciones pequeñas pero significativas en las relaciones ST/ $q_u$  (STS/UCS) que oscilaron entre 0,1 y 0,27 para diferentes duraciones y condiciones de curado. Sin embargo, cuando el mismo tipo de muestras se curó en condiciones y duración idénticas, no se produjo ninguna variación estadísticamente significativa.

El análisis de adsorción y desorción Brunauer–Emmett–Teller (BET N<sub>2</sub>) dio como resultado una reducción notable en micro y mesoporos, área de superficie de poro y volumen de poro a través de la adición de DFI, lo que sugiere que se rellenaron más poros con material cementicio con la adición de ese aditivo. Además, el análisis de succión matricial ( $U_a-U_w$ ) a través del método del papel de filtro también confirmó que las muestras de SCD compactadas con un contenido de humedad óptimo (OMC) dieron un 5 % y un 17 % más de fuerza de succión (kPa) que las muestras de SC y S del mismo OMC.

Como la succión matricial afecta directamente la fuerza del suelo, los suelos estabilizados con DFI lograron una mayor succión matricial, lo que resultó en valores de UCS y STS estadísticamente más altos.

## **1. Palabras clave**

Estabilización de suelos, aditivo Duraflex (DFI), compuestos cementicios, resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la tracción por hendidura, succión matricial, porosidad.

## Aspectos destacados

- La adición de Duraflex al suelo estabilizado con cemento mejoró significativamente la resistencia a la compresión no confinada, el módulo elástico y la resistencia a la tracción por hendidura.
- En ambas condiciones de curado, SCD resultó en el mayor rendimiento de resistencia.
- Las muestras curadas en el laboratorio tuvieron mayor resistencia que las curadas en la sala de curado.
- Los cambios observados a través de la succión matricial y el análisis BET N2 indican una menor porosidad en las muestras de SCD, en consonancia con su mayor resistencia.

## Abreviaturas

### 2. Introducción

La construcción de estructuras en sitios donde el suelo exhibe propiedades de ingeniería pobres requiere la estabilización del suelo.

Se han utilizado numerosas técnicas para estabilizar suelos débiles, como el método de corte y relleno, sistemas de drenaje vertical, tratamiento con enzimas biológicas y tratamiento con productos químicos [1][2][3][4][5]. Estos procedimientos permiten desarrollar propiedades materiales adecuadas en el suelo para soportar cargas de cimentación.

La infraestructura civil pesada se beneficia así de estos avances. De hecho, los agentes estabilizadores pueden mejorar los materiales de mala calidad de manera asequible hasta el punto en que se pueden usar de manera eficiente en estructuras como subrasantes de pavimento [6][7]. Los agentes estabilizadores también mejoran los materiales naturales de calidad media y alta y han estabilizado de manera efectiva todo, desde piedras trituradas bien clasificadas hasta arcillas extremadamente plásticas [8][9][10].

La estabilización de suelos más antigua conocida ocurrió hace aproximadamente cuatro mil años mediante el uso de materiales y métodos naturales como la adición de vegetación u otras sustancias orgánicas, compactación, capas de piedra y grava, etc. Un enfoque más tecnológico para la estabilización del suelo comenzó hace aproximadamente ocho décadas [11]. La estabilización química es el método más común para mitigar las propiedades indeseables de la ingeniería del suelo. Esta técnica implica mezclar suelo débil con aglutinantes como cemento, cal, cenizas volantes, etc. que reaccionan químicamente en presencia de humedad para adherir/unir partículas de suelo entre sí, lo que da lugar a una estructura de suelo más robusta [12][13,14]. La estabilización del suelo se ha investigado ampliamente, siendo la cal o el cemento los estabilizadores químicos más comunes debido a su potencial para mejorar las características físicas y geotécnicas del suelo tratado [15,16]. Dichos suelos estabilizados se pueden utilizar en muchas aplicaciones para infraestructura civil, incluidos pavimentos de carreteras o caminos de transporte, estacionamientos y plataformas de pozos petrolíferos.

Se espera que la demanda mundial de cemento Portland ordinario (OPC) aumente a una tasa anual del 5 % [17]. Sin embargo, producir 1 tonelada de OPC emite alrededor de 0,9 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), requiere alrededor de 5,6 gigajulios (GJ) de energía y utiliza aproximadamente 1,5 toneladas de materiales vírgenes extraídos de canteras [18]. El OPC, que tradicionalmente ha servido como el principal aglutinante en los materiales de construcción, representa alrededor del 5% al 7% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> [19]. Esto ha generado un enorme interés en sustituir un aglutinante más ecológico por cemento para reducir el impacto ambiental de los suelos estabilizados con cemento y mejorar la modificación del hormigón al tiempo que se mejoran las propiedades de ingeniería.

**Duraflex Admixture (DFI)** es un aditivo de cemento para estabilización de suelos patentado de cuarta generación. Con el cemento, el DFI puede convertir todo tipo de suelo ordinario en un valioso material de construcción, eliminando potencialmente la necesidad de extraer, transportar y colocar costosos materiales agregados del subsuelo.

Por lo tanto, se examinaron en el laboratorio la resistencia, la permeabilidad, la consistencia y los beneficios ambientales de la estabilización del suelo con cemento y DFI.

Se realizaron ensayos de compresión no confinada (UCS) y de tracción por hendidura (STS) en muestras de suelo (100 % suelo), suelo (90 %) más cemento (10 % del peso seco total de la muestra) (SC) y suelo (90 %) más cemento (10 % del peso seco total de la muestra) más aditivo Duraflex (2 % del peso seco del cemento) (SCD).

Se examinaron dos condiciones de curado diferentes: curado en la cámara de niebla (100 % HR, 20 °C) y en el entorno de laboratorio. Las muestras se analizaron después de 7, 14, 28 días y 10 meses de curado. Además de UCS y STS, también se derivó la relación ST/qu para medir la variación entre la duración de la prueba y la condición de curado. Por último, en los tres tipos de muestras, se realizó el análisis Brunauer-Emmett-Teller (BET N<sub>2</sub>) que dio como resultado un análisis en profundidad del volumen de poros y del área de superficie de poros, además de evaluar la succión matricial (U<sub>a</sub>-U<sub>w</sub>) que proporcionó información sobre el aire de poros y la presión del agua de poros.

### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1. Materiales**

##### **3.1.1. Suelo**

El suelo utilizado en esta investigación se recolectó del Parque Industrial North Dufferin en el sudeste de Calgary, Alberta, Canadá.

Se excavó un pozo de 3 metros de profundidad y se recolectó el suelo.

El suelo se clasificó como una arcilla limosa bien graduada (clasificación de grupo A-4), según el sistema de clasificación de la Asociación Estadounidense de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO) [20].

Las propiedades físicas del suelo se presentan en la Tabla 1.

El análisis cuantitativo de difracción de rayos X (Q-XRD) (realizado en Activation Laboratories Ontario Canada [Actlabs Ontario] y el Departamento de Química de la Universidad de Calgary) indicó que el cuarzo, el feldespato y la clorita eran los principales componentes del suelo.

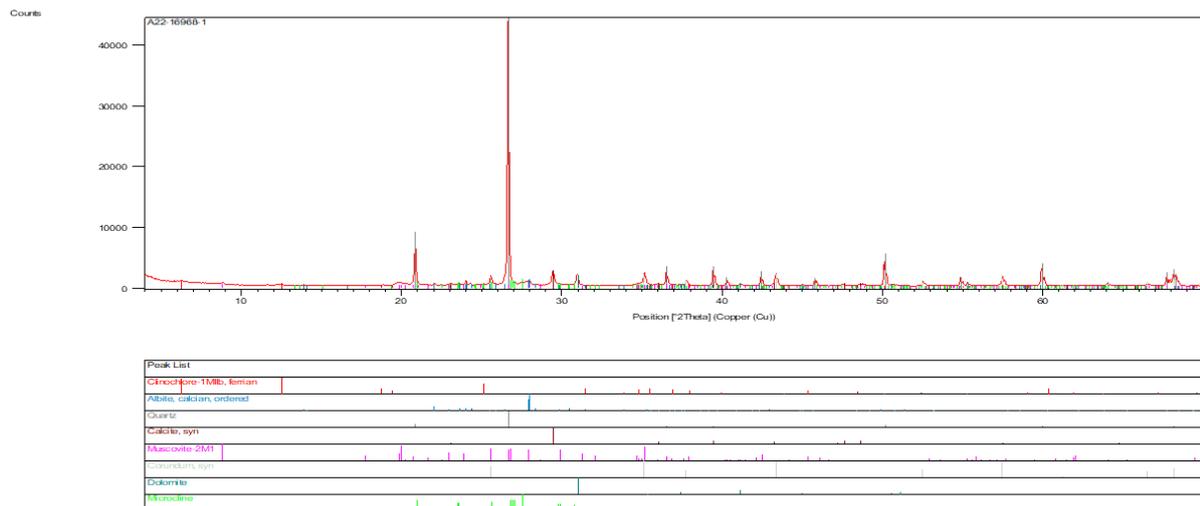
Los elementos sílice, calcio, aluminio, potasio, etc. mencionados en la Tabla 2 se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X

de energía dispersiva (EDS) realizada en el Departamento de Ingeniería Química y del Petróleo de la Universidad de Calgary.

La principal composición mineralógica del suelo es cuarzo (SiO<sub>2</sub>), plagioclasa (Na<sub>0,5</sub>Ca<sub>0,5</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), moscovita (KAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>AlO<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>) y dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) como se muestra en la Figura 1.

**Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso limoso**

Property	Value
Soil type	Silty soil/clay (AASHTO group A-4)
In Situ moisture content of soil	17%
Grain size distribution (%)	4.99 % Sand, 40.21% Silt, 54.8% Clay
Liquid Limit, wL (percent)	28 %
Plastic Limit wP (percent)	21.89 %
Plasticity Index, pl	6.01 %
Specific Gravity of soil (G <sub>s</sub> )	2.6
pH	7.95
Organic content/ Loss on Ignition test (LOI)	4.57%



**Figure 1. Quantitative XRD analysis on the silty clay soil sample (Act Labs Ontario)**

**Table 1. Elements and Oxides in silty clay soil as per SEM/EDS analysis**

Element (symbol)	Characteristics (weight concentration)	Oxides	Characteristics (%)

Oxygen (O)	34.22	Silicon oxide (SiO <sub>2</sub> )	35.92
Silicon (Si)	15.55	Calcium oxide (CaO)	32.11
Carbon (C)	21.25	Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	3.99
Iron (Fe)	19.72	Magnesium oxide (MgO)	3.14
Aluminium (Al)	6.19	Others/unidentified	---
Potassium (K)	3.07		

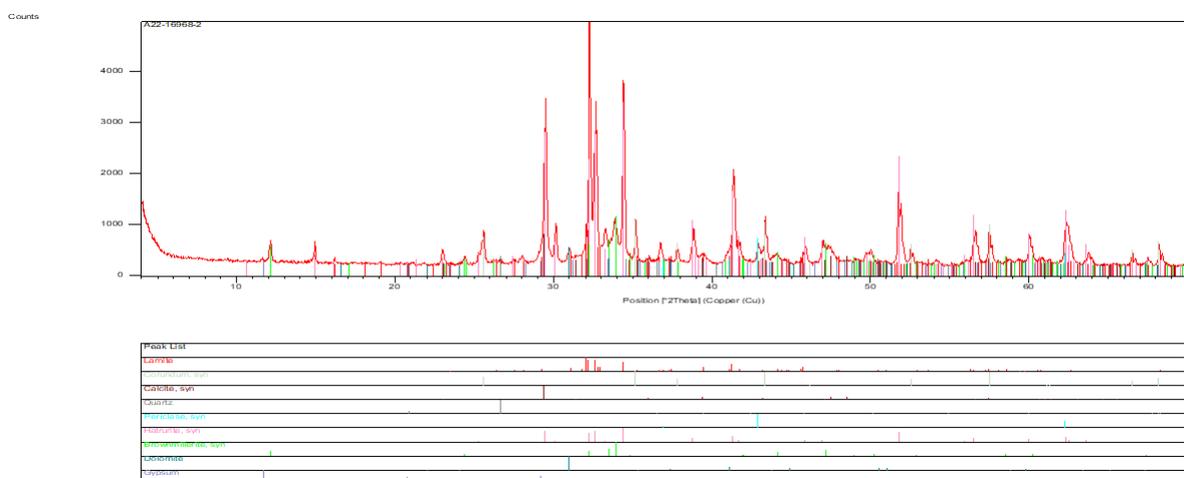
### 3.1.2. Cemento

Se utilizó OPC de uso general (GU), que cumple con las especificaciones y normas de ASTM C 150 [21], como material aglutinante para la estabilización del suelo.

El cemento puede hidratarse y reaccionar con los minerales del suelo en presencia de agua, mejorando las propiedades de ingeniería del suelo, como la resistencia, la durabilidad, etc. La principal composición mineralógica del OPC utilizado fue hatrurita (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> (C3S)), brownmillerita (Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub> (C4AF)), yeso (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), calcita (CaCO<sub>3</sub>), portlandita (Ca (OH)<sub>2</sub>), periclusa, larnita (β-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (C2S)), dolomita (CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), como se muestra en la Figura 2.

**Table 2. Cement composition**

Stabilising agent	Composition	Source/supplier
Cement	Ordinary Portland Cement (OPC) Types GU	QUIKRETE



**Figure 2. Quantitative XRD analysis on the Portland cement type GU (Act Labs Ontario)**

### 3.1.3. Aditivo Duraflex (DFI)

Duraflex Solution Limited proporcionó el DFI patentado para este estudio.

### 3.1.4. Agua

Se utilizó agua destilada durante todo el programa experimental. La razón principal para usar agua destilada fue la consistencia en los resultados.

## 4. Metodología

### 4.1. Preparación de los materiales de prueba

El suelo recibido del sitio contenía humedad y escombros. Para garantizar la consistencia y confiabilidad en la prueba, el suelo necesitaba ser preparado.

Primero, **el suelo se secó en horno durante 24 horas de acuerdo con ASTM D2216-19** a  $110 \pm 5$  °C para eliminar la humedad del campo [22].

Los escombros y las rocas se eliminaron del suelo seco después de enfriarlo.

Se utilizaron una trituradora Bico y un pulverizador Bico **para triturar los trozos de suelo en el tamaño deseado.**

Después de pulverizar, **el suelo se tamizó a través de un tamiz No. 40** (4,75 mm) de acuerdo con ASTM D698-21 y se utilizó en la preparación de las muestras [23].

El cemento y el DFI no necesitaron preparación y se guardaron en contenedores herméticos después de que se abrieron las bolsas **para evitar el contacto con la humedad y la humedad del ambiente.**

### 4.2. Diseño de la mezcla

Las muestras UCS y STS se prepararon a partir del suelo y *pasaron por el tamiz No. 4* (4,75 mm) para seguir las normas ASTM y mantener la uniformidad: se descartó cualquier material retenido.

El suelo, el cemento (10% del peso seco total de la muestra) y el aditivo Duraflex (2% del cemento en peso seco) se pesaron por separado antes de mezclar en seco en un mezclador mecánico durante 10 minutos, seguido de mezclar a mano con espátulas y paletas pequeñas.

Se realizaron pruebas de compactación Proctor estándar en los tres materiales resultantes para derivar el contenido de humedad óptimo (OMC) para sus densidades secas máximas (MDD).

El OMC obtenido a partir de este método se utilizó luego como estándar para preparar muestras de cada tipo.

### 4.3. Preparación de especímenes

Para determinar el OMC, se prepararon cuatro muestras de cada material (S, SC y SCD) de acuerdo con el método Proctor estándar descrito en ASTM D698-21 [23].

Una vez que se determinó el OMC para cada material, se agregó esa cantidad óptima de agua destilada (pH 7) a las muestras secas mezcladas mecánicamente y a mano. Inicialmente, la mezcla se llevó a cabo en la mezcladora mecánica, pero debido a la alta

cohesión de la arcilla y la adhesión de las partículas de tierra, la tierra húmeda se pegó a los límites del recipiente de mezcla y a las cuchillas de la licuadora. Por lo tanto, se empleó la mezcla manual a partir de entonces para asegurar la uniformidad de la mezcla y que todos los grumos se desintegraran a un tamaño inferior a 5 mm.

Se prepararon ciento cuarenta y cuatro (144) muestras para las pruebas UCS y STS en moldes de prueba Proctor estándar (diámetro de 101,6 mm y altura de 116,4 mm).

Cada molde se llenó en 3 capas iguales y cada capa recibió 25 golpes con un apisonador.

La superficie superior de la primera y la segunda capa compactada se raspó para mejorar el agarre/sujeción de las capas posteriores.

Las muestras se desmoldaron a través de un gato hidráulico después de completar la compactación.

#### 4.4. Condiciones de curado y duración

Después de retirar las muestras, la mitad (72) se colocaron en la sala de curado con una humedad del 100%, mientras que las otras 72 se dejaron en el laboratorio. El propósito de esto último fue utilizar el laboratorio más como una condición de campo ya que en la práctica el suelo generalmente se estabiliza y se deja hidratar en el ambiente abierto.

Se probaron tres muestras de cada mezcla para UCS y STS a los 7, 14 y 28 días y 10 meses.

#### 4.5. Procedimiento de prueba

##### 4.5.1. Prueba de compresión no confinada

La UCS se realizó siguiendo la norma ASTM D2166-24 para suelos cohesivos [24]. Las muestras se probaron a una tasa de deformación axial de 1 %/min. El valor más alto de tensión del UCS se calculó a partir de la carga máxima alcanzada o el valor de tensión al 15 % de deformación, lo que ocurriera primero, y la prueba se detuvo de acuerdo con las pautas de ASTM D2166-24.

Teniendo en cuenta los valores de UCS medidos, las propiedades de ingeniería del suelo estabilizado se evaluaron utilizando las pautas proporcionadas por la ASTM D 4609 [25] que establece que **"la estabilización puede considerarse exitosa si la resistencia del UCS da como resultado un aumento mínimo de 345 kPa"** y la clasificación de consistencia (Tabla 4) propuesta por Terzaghi et al., [26].

**Table 4.** Fine-grained soil consistency classification (modified from (Terzaghi et al.))[26])

Consistency	Unconfined compression strength (UCS, kPa)
Very soft	UCS values less than 24
Soft	Values between 24-50
Medium	Values between 50-100
Stiff	Values between 100-200
Hard/ very stiff	Values between 200-400
Very hard	Values greater than 400

#### 4.5.2. Prueba de resistencia a la tracción por hendidura

Las muestras de hormigón STS se probaron de acuerdo con el método adoptado por Thompson [27] y Ramanathan [28].

La prueba de hendidura se utiliza principalmente para la evaluación de las propiedades de hendidura del hormigón según la norma ASTM C496. Esta prueba se adopta fácilmente para materiales de carreteras estabilizadas que son frágiles por naturaleza y tienen baja resistencia a la tracción.

En la prueba STS, las muestras cilíndricas se colocaron horizontalmente entre las placas de carga, se colocaron tiras de carga por encima y por debajo de la muestra como se muestra en la Figura 3 para distribuir la carga. Por lo general, las muestras que son frágiles y tienen baja resistencia a la tracción fallan a lo largo del diámetro cargado.

Las muestras se probaron a una tasa de deformación del 1 %/min.



*Figure 3. Splitting tensile strength test*

Al adoptar la STS para suelos cohesivos, es importante saber si el suelo es frágil. En este caso, los suelos se comportaron como materiales duros/frágiles, cumpliendo con las normas ASTM D 4609 y la clasificación de consistencia de Terzaghi et al. [26].

La STS se determinó a partir de:

$$St = \frac{2P}{\pi DL}$$

Donde:

St = Resistencia a la tracción por hendidura (MPa)

P = Carga de rotura en Newtons (N)

D = Diámetro de la muestra cilíndrica (mm)

L = Longitud de la muestra cilíndrica (mm)

## **4.6. Análisis de la estructura de poros**

### **4.6.1. Análisis de Brunauer–Emmett–Teller**

Se realizó un análisis de Brunauer–Emmett–Teller (análisis BET N<sub>2</sub>) en muestras de S, SC y SCD para evaluar la microporosidad y el área de superficie de los poros.

El proceso de desgasificación se llevó a cabo a 105 °C para garantizar que se eliminaran todos los gases y/o la humedad adsorbida de las muestras. Luego, las muestras se dejaron enfriar en el desecador y, posteriormente, se analizaron para determinar la adsorción de nitrógeno en un Beckman Coulter J26S-XP.

La información del área de superficie específica se calculó después de la adsorción de nitrógeno en la isoterma en el rango de presión ( $P/P_0$ ) de 0,01 a 0,96 (siendo  $P_0$  la presión de saturación del nitrógeno). Además, se identificó la microporosidad a través del método Barrett-Joyner-Halenda (BJH), que proporciona la distribución del tamaño de poro de las muestras.

Esta evaluación de la porosidad y área superficial a través de BET N<sub>2</sub> se realizó para determinar si hubo un cambio en la microporosidad que pudiera explicar las mejoras en la resistencia mecánica, como se demostró en las pruebas UCS y STS después de la incorporación de DFI.

### **5.6.2 Succión mátrica**

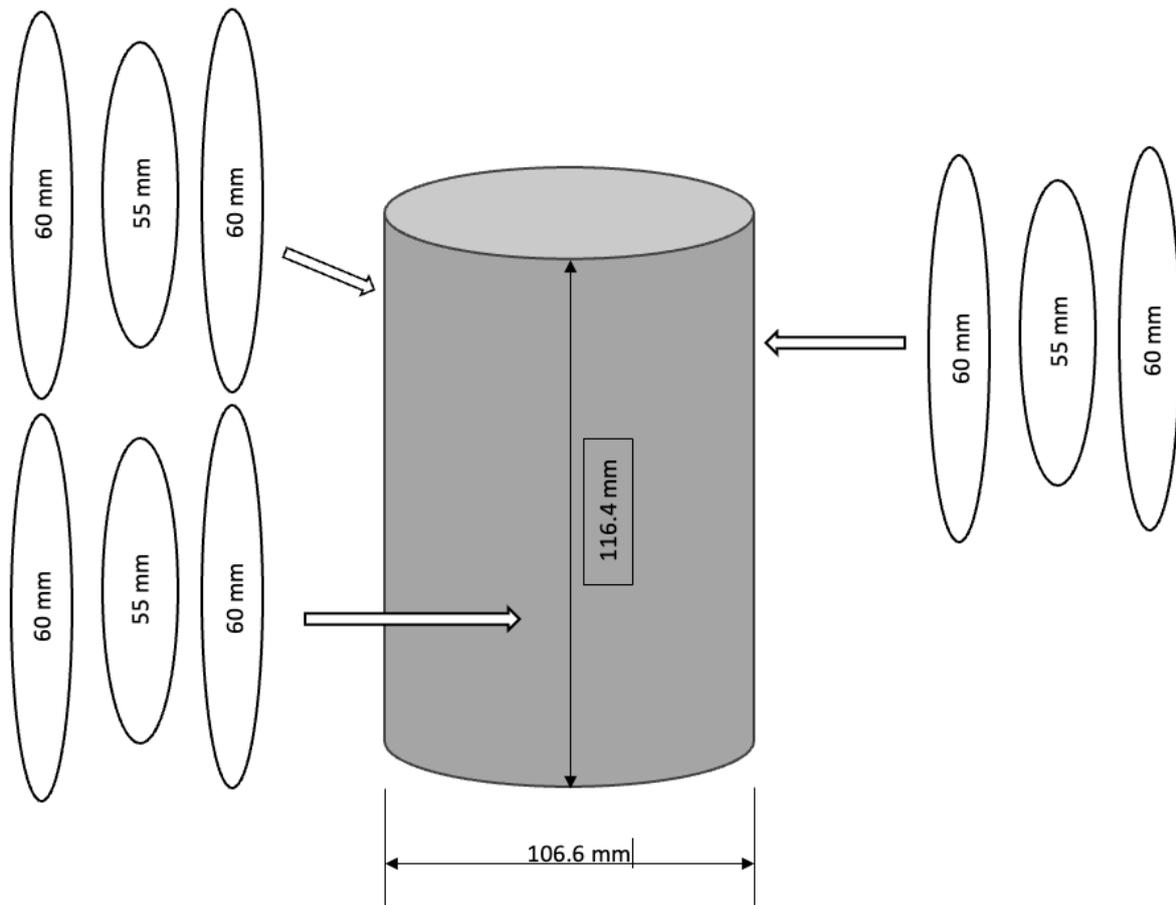
Esta prueba se utilizó para determinar las características de succión mátrica ( $U_a-U_w$ ) del suelo arcilloso limoso compactado y cómo la succión mátrica afecta la resistencia del suelo.

En este estudio, se utilizó un método indirecto (el método del papel de filtro) de acuerdo con ASTM D5298-16 [29]. En este método, se colocó un papel de filtro en contacto directo con la muestra. Después de que se intercambia la humedad, que generalmente demora de 8 a 14 días, se alcanza un estado de equilibrio.

Siguiendo el estándar, se utilizaron papeles de filtro Whatman No. 42 con diámetros de 55 mm y 60 mm. Se preparó una solución de formaldehído (2%), en la que se remojaron los papeles de filtro durante 24 horas para evitar la formación de moho. Las muestras de S, SC y SCD se compactaron a un 4 % y un 3 % por debajo de OMC, a OMC y a un 3 % y un 4 % por encima de OMC.

Las muestras se compactaron en un molde Proctor estándar e inmediatamente después de sacarlas del molde, se colocó un papel de filtro de 55 mm de diámetro entre papeles de filtro de 60 mm de diámetro y se intercaló sobre el molde y, de manera similar, se colocaron dos papeles de filtro más de 55 mm de diámetro intercalados a la misma distancia entre sí alrededor de la circunferencia de la muestra compactada, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.

Luego, cada muestra se selló en una bolsa de plástico con la ayuda de una máquina de succión de aire y se selló herméticamente dos veces. Las muestras selladas se colocaron en una sala de curado con una temperatura de 21 °C ± 2 °C durante 10-12 días, lo que permitió que las muestras alcanzaran un estado de equilibrio de humedad.



**Figure 4.** Schematic of Whatman No.42 filter paper placement on mould.

Una vez equilibrados, los papeles de filtro húmedos de 55 mm de diámetro se retiraron cuidadosamente con dos pinzas y se pesaron, seguido de un secado en horno y un pesaje posterior para obtener el porcentaje de contenido de agua.

Las curvas de calibración se utilizaron para determinar la succión mátrica del suelo. [30] [31]

$\text{Log (succión mátrica en kPa)} = 4,945 - 0,0673w$  (para contenido de agua,  $w < 47\%$ )

$\text{Log (succión mátrica en kPa)} = 2,909 - 0,0229w$  (para contenido de agua,  $w \geq 47\%$ )

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Resistencia a la compresión no confinada

Los valores UCS para las muestras S, SC y SCD a los 7, 14, 28 días y 10 meses en ambas condiciones de curado (laboratorio y sala de curado) se presentan en la Tabla 5.

Los valores son el promedio y la desviación estándar de tres muestras. Como se puede ver en la tabla y la Figura 5, el UCS aumentó de 7 días a 10 meses para todos los tipos de muestras.

**La adición de Duraflex (SCD) resultó en las resistencias más altas en ambas condiciones de curado**, lo que proporcionó resistencias del suelo estadísticamente mayores (prueba t) que el cemento solo en todas las edades cuando se curó en el laboratorio, excepto a los 7 días.

Los valores UCS en la Tabla 5 también se evaluaron en comparación con ASTM D 4609 [25] que establece que, si el valor UCS mínimo es de 340 kPa o más para cualquier tipo de modificación/estabilización del suelo, entonces la estabilización es efectiva.

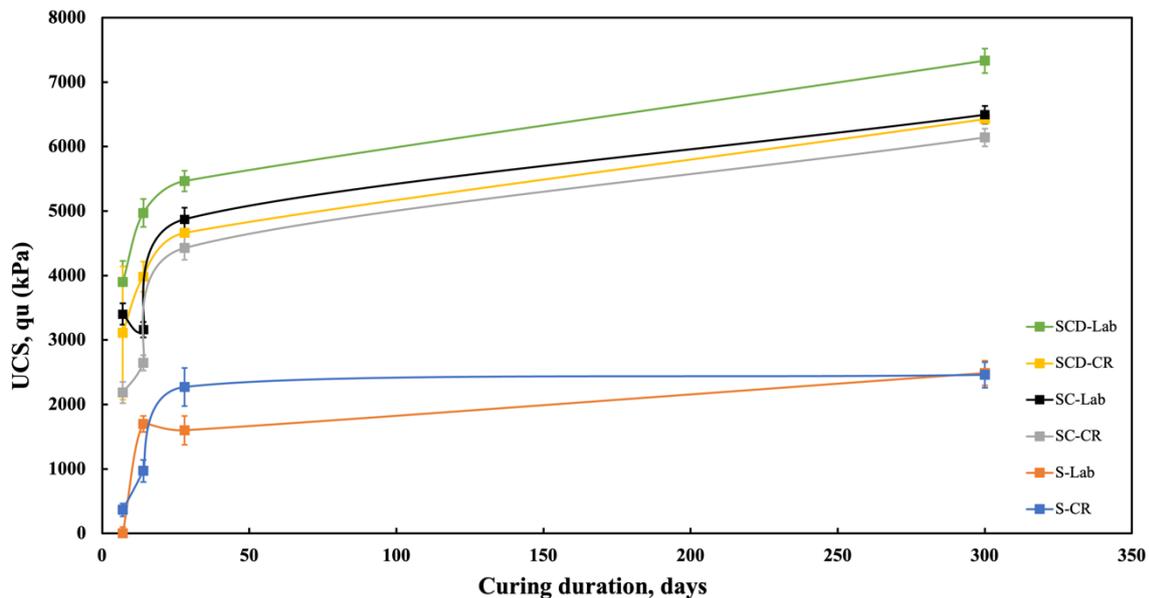
Además, los valores UCS en la tabla mencionada también se evaluaron según la clasificación de consistencia de Terzaghi et al. [26]. De acuerdo con estos criterios, la modificación del suelo arcilloso limoso utilizando cemento y agentes estabilizadores de mezcla Duraflex funcionó bien, lo que resultó en una resistencia mayor que el límite inferior de ASTM D 4609 y **calificó como "duro"** de acuerdo con la clasificación de consistencia de Terzaghi.

*Table 5. UCS test results*

Curing duration	Sample type	UCS samples (kPa) in Curing Room	Standard deviation, (kPa)	UCS samples (kPa) in Lab condition	Standard deviation, (kPa)	UCS increase (kPa) ASTM D4609	Consistency Classification (Terzaghi et al., 1996)
07 Days	S	366	98	1700	101	<b>&gt;340</b>	Stiff
	SC	2186	165	3402	211	<b>&gt;340</b>	Hard
	SCD	3110	1033	3900	328	<b>&gt;340</b>	Hard
14 Days	S	971	171	1600	124	<b>&gt;340</b>	Hard
	SC	2644	119	3160	229	<b>&gt;340</b>	Hard
	SCD	3983	233	4970	216	<b>&gt;340</b>	Hard
28 Days	S	2271	294	2488	223	<b>&gt;340</b>	Hard
	SC	4427	180	4873	141	<b>&gt;340</b>	Hard
	SCD	4661	168	5465	158	<b>&gt;340</b>	Hard
10 months	S	2460	198	3352	193	<b>&gt;340</b>	Hard
	SC	6143	138	6494	261	<b>&gt;340</b>	Hard
	SCD	6428	156	7331	189	<b>&gt;340</b>	Hard

*Note: the values stated are the average of triplicate samples*

*The bold values indicate ASTM D 4609 (standard guide) standards satisfied*



**Figure 5.** UCS (kPa) vs curing duration (days)

### 5.1.1. Relaciones de esfuerzo-deformación de UCS

Se obtuvieron las relaciones de esfuerzo-deformación de todas las muestras.

Los resultados/curvas de 28 días se presentan en las Figuras 6-8.

El desplazamiento sobre la altura total de la muestra se obtuvo con un transformador diferencial variable lineal (LVDT) que luego se convirtió en valores de deformación en %.

La adición de cemento y cemento más DFI hace que las mezclas sean ligeramente más frágiles, ya que parece haber menos rama descendente después del pico.

El comportamiento de esfuerzo-deformación de todas las muestras, ya sean S, SC y/o SCD, dependió tanto de la duración del curado como de las condiciones de curado.

Cuando se curaron en el laboratorio, la deformación máxima promedio a los 7 días de las muestras S compactadas fue del 5,71 %, reduciéndose a un promedio del 3,26 % a los 10 meses.

De manera similar, las muestras SC tuvieron una deformación máxima promedio del 5,7 % a los 7 días de curado, reduciéndose al 2,64 % a los 10 meses.

Por último, la deformación máxima promedio de las muestras de SCD fue de 5,06 % a los 7 días, mientras que a los 10 meses la deformación máxima promedio se redujo a 1,39 %.

De manera similar, cuando se curaron en la sala de curado, la deformación máxima promedio de 7 días para las muestras de S compactadas fue de 7,05 %, reduciéndose a 4,51 % a los 10 meses.

Para las muestras de SC y SCD, las deformaciones máximas promedio se redujeron de 6,33 % y 5,01 % a los 7 días a 4,01 % y 2,76 % a los 10 meses respectivamente.

Esta disminución en la deformación con el tiempo de curado se debió a la hidratación continua del cemento y el DFI. Los productos de reacción del DFI en las mezclas de SCD dieron como resultado una estructura más densa y una reducción en el volumen de poros con el tiempo, lo que a su vez da como resultado una mayor resistencia.

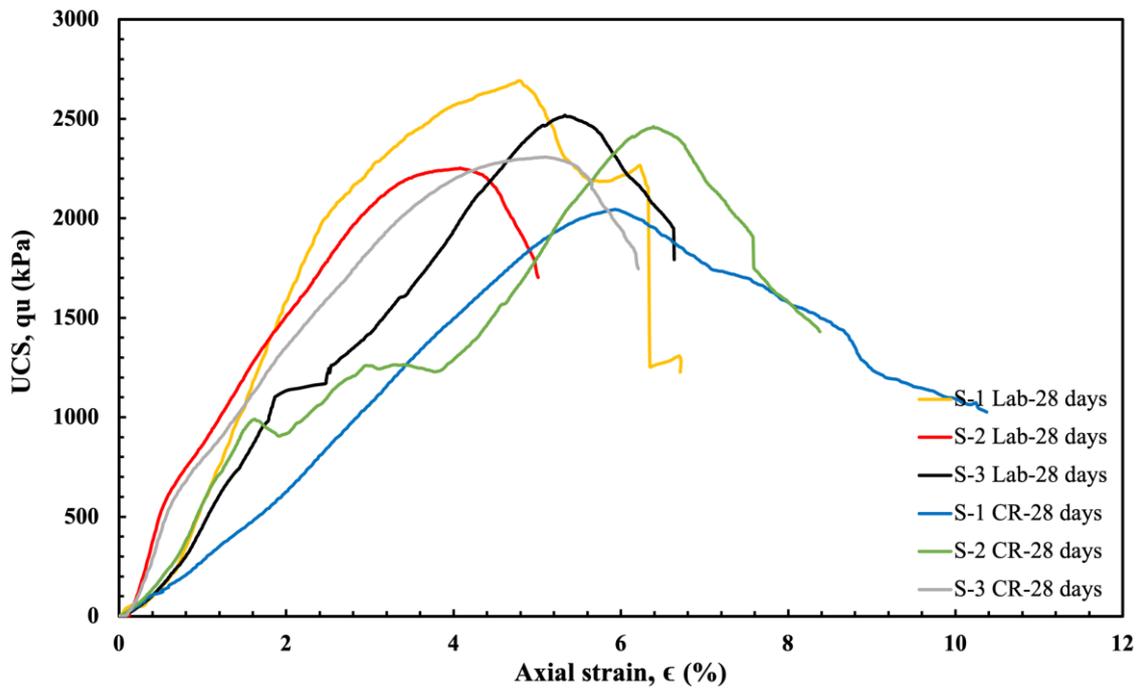


Figure 6. UCS 28-day stress-strain curves of S (Lab, and CR samples)

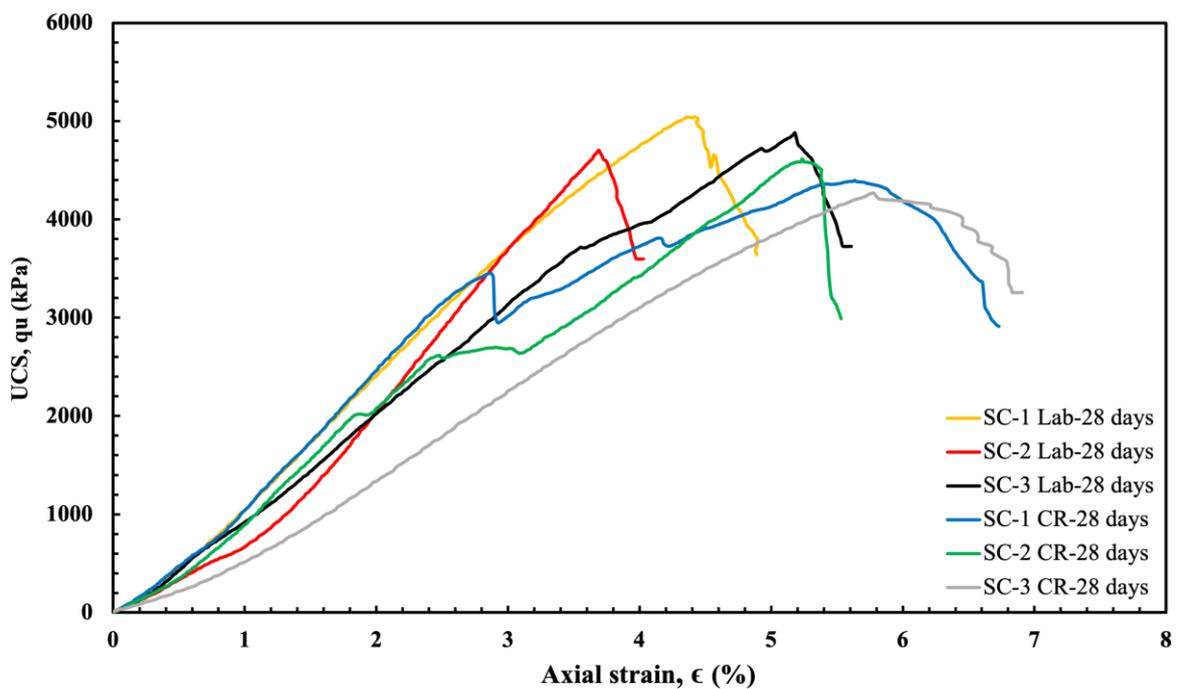
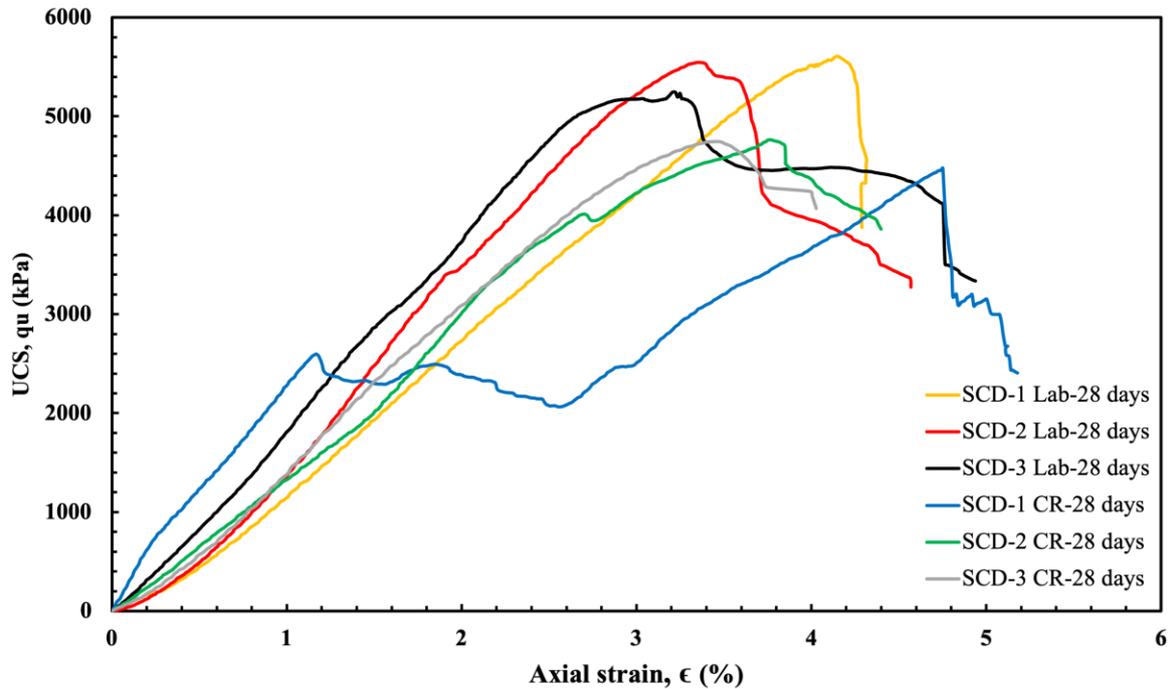


Figure 7. UCS 28-day stress-strain curves of SC (Lab, and CR samples)



**Figure 8.** UCS 28-day stress-strain curves of SCD (Lab, and CR samples)

### 5.1.2. Análisis del módulo elástico

El módulo elástico se calculó para los tres tipos de muestras como la pendiente del 5% al 30% de la tensión máxima y los valores del módulo elástico se tabulan en la Tabla 6.

Como se puede ver, las muestras de SCD fueron consistentemente más rígidas que el suelo solo o el suelo estabilizado solo con cemento.

Los resultados de la muestra de SCD confirmaron que cuando se utiliza cemento y DFI en la estabilización del suelo y en proyectos de mejora del suelo débil, se logrará la rigidez del suelo y la estabilidad a largo plazo. Además, este módulo elástico mejorado respalda la idea y la investigación sobre el uso de Duraflex para proyectos de estabilización del suelo a largo plazo, especialmente donde la durabilidad de la superficie estabilizada es importante.

**Table 6.** Modulus of S, SC, and SCD samples between 5 and 30% of peak stress

Curing duration	Sample type	Curing room average Elastic Modulus (kPa)	Standard deviation (kPa)	Lab-Cured average Elastic Modulus (kPa)	Standard deviation (kPa)
07 Days	S	30910	38946	40060	600
	SC	55160	24114	77380	7504
	SCD	70930	35327	116540	26911
14 Days	S	29080	1973	65000	12309
	SC	61120	5430	85470	36313
	SCD	100910	39932	121140	23912

28 Days	S	69340	34242	88980	27859
	SC	111330	27707	120370	9212
	SCD	169970	30097	172170	4373
10 months	S	130640	51617	188000	45711
	SC	191190	36415	518000	586239
	SCD	386600	104183	829020	641827

**Note:** the values stated are the average of triplicate samples

## 5.2. Resistencia a la tracción por hendidura

Los resultados de las pruebas de resistencia a la tracción por hendidura se tabulan en la Tabla 7.

Para las muestras de solo suelo, la resistencia de la STS aumentó de 100 kPa a los 7 días a 250 kPa a los 10 meses en la sala de curado, mientras que en las muestras curadas en laboratorio el aumento fue de 170 kPa a 400 kPa.

Las muestras SC aumentaron de 500 kPa a 820 kPa en la sala de curado y de 630 kPa a 930 kPa en el laboratorio.

Las muestras que incluían Duraflex (SCD) aumentaron en resistencia de 7 días a 10 meses de 610 kPa a 1000 kPa en la sala de curado y de 697 kPa a 1200 kPa en el laboratorio.

De manera similar, después de realizar la prueba t, las muestras SCD fueron estadísticamente más fuertes que las muestras SC y la diferencia aumentó del día 7 a los 10 meses.

**Table 7.** Splitting tensile test results and ratio to unconfined compression strength ( $S_T/q_u$ )

Curing duration	Sample	Split tensile test (kPa) Curing room samples	Standard deviation, (kPa)	Ratio ( $S_T/q_u$ ) Curing room samples	Split tensile test (kPa) Lab condition samples	Standard deviation, (kPa)	Ratio ( $S_T/q_u$ ) Lab condition samples
7 days	S	100	62	0.27	170	53	0.10
	SC	500	87	0.23	630	96	0.19
	SCD	610	90	0.20	697	88	0.18
14 days	S	112	64	0.12	200	60	0.13
	SC	570	71	0.22	720	89	0.23
	SCD	700	86	0.18	780	63	0.16
28 days	S	240	60	0.11	380	63	0.15
	SC	660	77	0.15	810	70	0.17
	SCD	778	94	0.17	940	73	0.17
10 months	S	250	62	0.10	400	66	0.12
	SC	820	87	0.13	930	71	0.14
	SCD	1000	89	0.16	1200	85	0.16

**Note:** the values stated are the average of triplicate samples

### **5.2.1. Relación entre la resistencia a la tracción por hendidura y la resistencia a la compresión sin confinar (ST/qu)**

Las relaciones entre la resistencia a la tracción por hendidura y la resistencia a la compresión (relación ST/qu) para las muestras S, SC y SCD se enumeran en la Tabla 7.

Se puede observar que, para las muestras de suelo, la relación ST/qu disminuyó de 0,27 a los 7 días a 0,1 a los 10 meses en la sala de curado, y la mayor parte del cambio se produjo entre los 7 y los 14 días.

Con el curado en laboratorio, la relación se mantuvo en el rango de 0,10 a 0,15.

Para las muestras de suelo más cemento, la relación ST/qu disminuyó de 0,23 a 0,13 en las muestras de la sala de curado y de 0,19 a 0,14 en las muestras curadas en laboratorio desde el día 7 hasta los 10 meses respectivamente.

En la sala de curado, la reducción de la relación fue más lenta que para las muestras de suelo solas.

En el caso de las muestras curadas en laboratorio, la relación fue mayor a los 14 días que a los 7, lo que puede ser un reflejo de la variabilidad de la relación.

Por último, en el caso de las muestras con aditivo Duraflex, la relación ST/qu disminuyó de 0,20 a 0,16 a lo largo de los 10 meses en las muestras de la sala de curado, mientras que se mantuvo en el rango de 0,18 a 0,16 en las muestras curadas en el laboratorio.

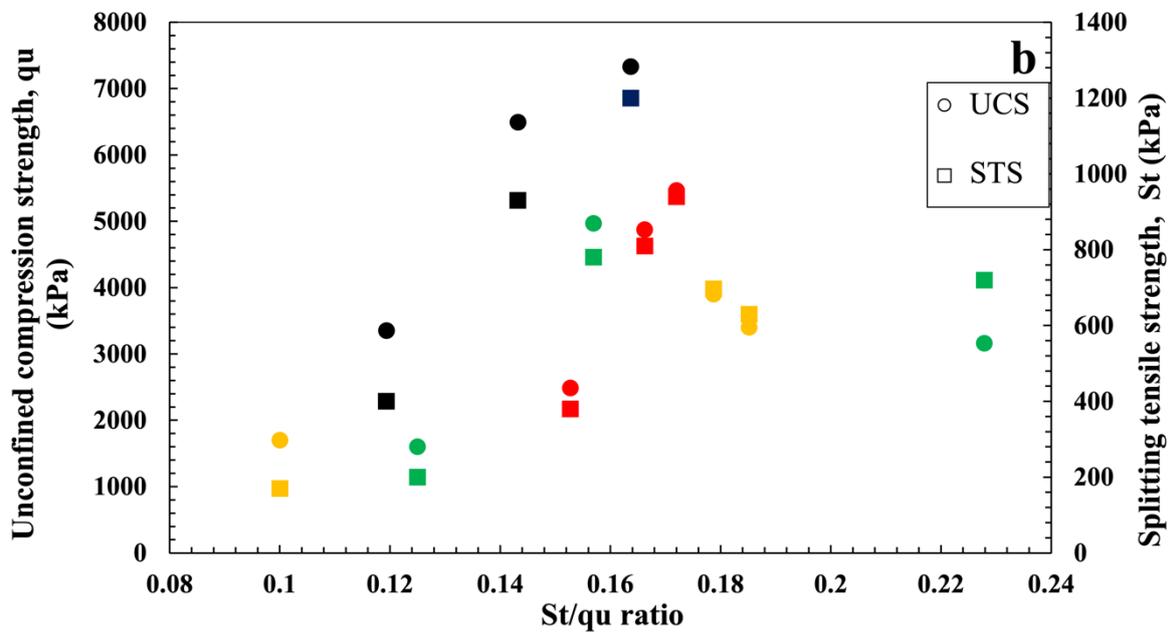
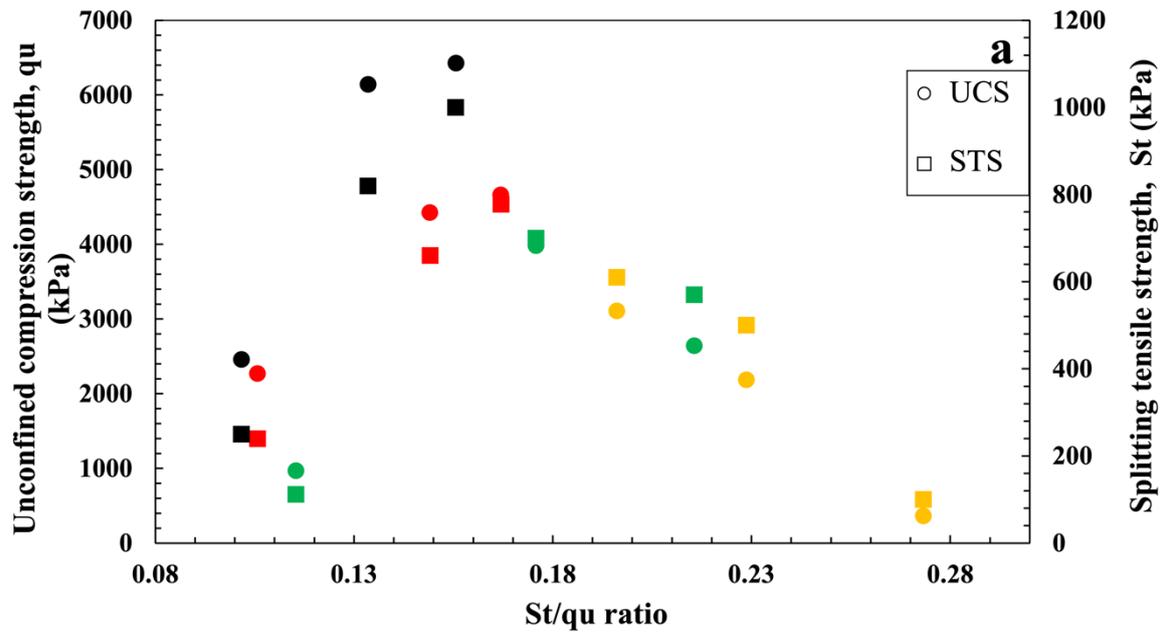
El hecho de que la resistencia a la tracción se encuentre en el rango de un décimo a un sexto de la resistencia a la compresión es coherente con otros materiales cementicios. La tendencia a una reducción en el valor de la relación para algunas mezclas en determinadas condiciones de curado sugiere diferentes tasas de ganancia de resistencia entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción a lo largo del período de 10 meses.

Por ejemplo, para las muestras de suelo más cemento curadas en la sala de curado, la resistencia a la tracción aumentó de 500 a 820 kPa (un aumento del 64 %), mientras que la resistencia a la compresión aumentó de 2186 a 6143 kPa (un aumento del 180 %).

Los valores medios de la resistencia a la compresión y a la tracción de los diversos grupos de muestras se representan gráficamente frente a su relación ST/qu en las Figuras 9 a y b.

El par inferior de cada color (edad de curado) es para S, la altura media para SC y el par más alto para muestras SCD. Por lo tanto, se puede ver la variabilidad de la relación ST/qu para cada edad de curado.

Curiosamente, la relación aumenta con el tipo de material (S a SC a SCD) tanto a los 28 días como a los 10 meses de curado en ambas condiciones de curado, pero con diferentes patrones para el curado en la etapa inicial.



**Note:** Yellow represents 7-Day samples; Green, 14-days; Red, 28-Days; Black, 10-Months

**Figure 3.** Splitting tensile strength vs. unconfined compression strength ratio ( $S_T/q_u$ ) (a) Curing room; (b) Lab curing

## 6. Análisis de la estructura de poros

### 6.1. Análisis de Brunauer–Emmett–Teller (BET N2)

El experimento de fisisorción se llevó a cabo 16 meses después de la colada de las muestras para comprender completamente los cambios a largo plazo en la porosidad y el área de superficie de los tres tipos de muestras (S, SC y SCD).

Las isothermas BET se muestran en la Figura 10, mientras que los resultados derivados de las mediciones se proporcionan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Área de superficie y porosidad de las muestras S, SC y SCD

Sample	Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Micropore Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Pore volume (ml/g)	Micropore volume (ml/g)
S	16.8	5.3	0.065	0.003
SC	10.3	3.9	0.068	0.002
SCD	9.1	3.0	0.057	0.001

### Superficie de la muestra

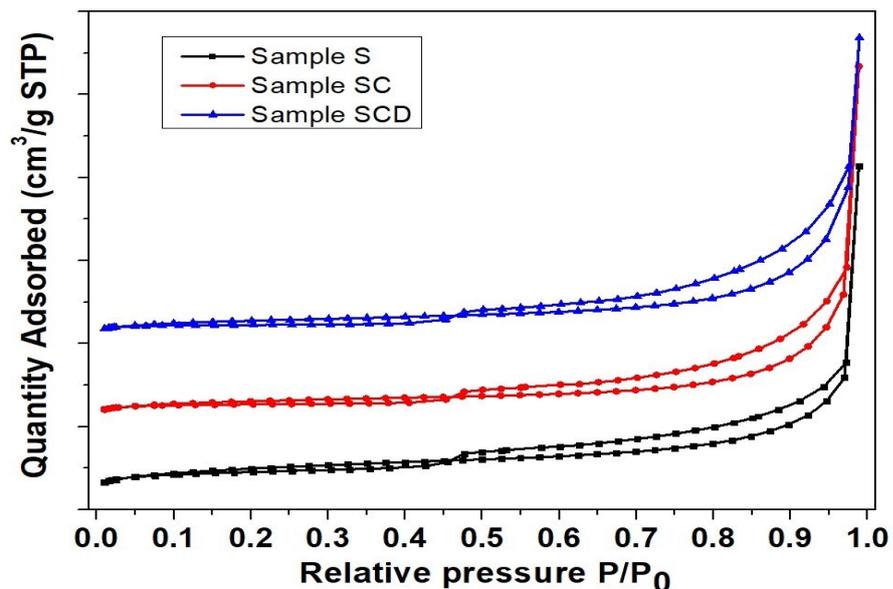
(m<sup>2</sup>/g) Superficie de microporos (m<sup>2</sup>/g) Volumen de poros

(ml/g) Volumen de microporos (ml/g)

S 16,8 5,3 0,065 0,003

SC 10,3 3,9 0,068 0,002

SCD 9,1 3,0 0,057 0,001



*Figure 4. Nitrogen adsorption–desorption BET isotherm of sample S, SC, and SCD*

## 6.2. Succión mátrica ( $U_a-U_w$ ) y resistencia del suelo

### 6.2.1. Curva característica de agua del suelo (SWCC)

Las muestras de S, SC y SCD se compactaron en OMC y con contenidos de agua 3% y 4% por encima y por debajo del nivel de OMC.

Los datos de succión mátrica se grafican contra el contenido de humedad del papel de filtro en la Figura 11, que representa las curvas características de agua del suelo de succión mátrica (kPa) de las muestras compactadas.

Las muestras de SCD compactadas al 4% y 3% por debajo de OMC y en OMC tuvieron un muy buen desempeño al lograr una fuerza de succión mátrica estadísticamente mayor en kPa que SC.

Es un fenómeno común que cuando las fuerzas de succión mátrica aumentan, la presión del agua de los poros disminuye, lo que resulta en fuerzas entre partículas más fuertes y, por lo tanto, una resistencia del suelo mejorada. Tanto estos datos de succión como los datos de BET indican que la porosidad de la mezcla con el aditivo Duraflex es menor que cuando se usa cemento solo para estabilizar el suelo. Es decir, los poros se rellenan con productos de reacción de la hidratación. Está bien establecido que una menor porosidad aumenta la resistencia de los materiales, y esto se refleja tanto en los resultados de UCS como de STS.

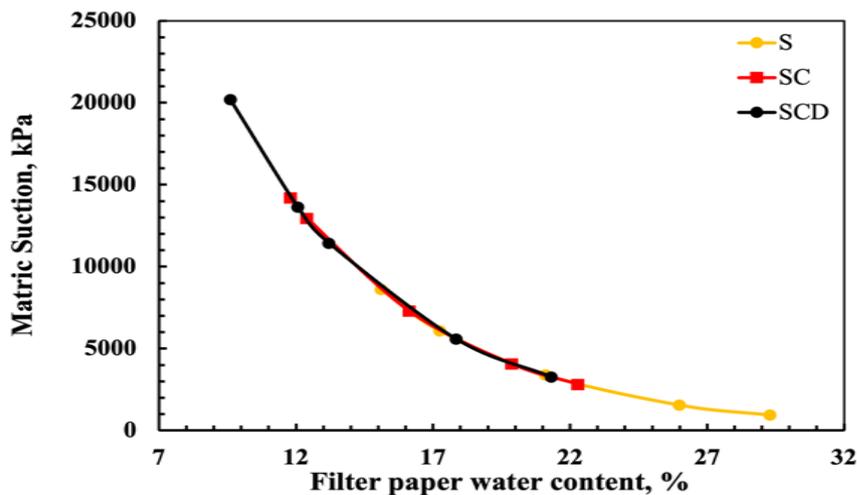


Figure 5. The soil-water characteristic curve of S, SC, and SCD compacted samples

## 7. Conclusiones

Se investigó el efecto del uso del aditivo Duraflex en la estabilización del suelo además del cemento.

Se examinaron diferentes condiciones de curado (en el laboratorio o en la sala de curado (100 % HR)) y diferentes duraciones de curado (7, 14, 28 días y 10 meses).

Tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la tracción aumentan con el tiempo, sin importar el tipo de muestra y la duración del curado, pero la ganancia en resistencia a la compresión tiende a ser mayor que la ganancia en resistencia a la tracción.

**Se pueden extraer las siguientes conclusiones de los resultados experimentales:**

- La resistencia a la compresión y a la tracción de las muestras estabilizadas con DFI fue mayor que la de otros tipos en ambas condiciones de curado.

- El comportamiento de tensión-deformación indicó que los SCD curados en laboratorio eran más frágiles que las muestras similares curadas en la sala de curado.
- Se observaron variaciones pequeñas pero significativas en la relación ST/qu que oscilaban entre 0,1 y 0,27 en diferentes duraciones y condiciones de curado. Sin embargo, cuando el mismo tipo de muestra se curó en condiciones y duración idénticas, no se produjo ninguna variación estadísticamente significativa.
- La mejor relación ST/qu calculada para suelos estabilizados con DFI es un promedio general de 0,16.
- La reducción en el área de superficie de microporos y el volumen de poros del suelo estabilizado con DFI examinado a través del análisis BET N2 confirmó que más productos de hidratación llenaron estos poros, lo que resultó en una mejora de la resistencia.
- **Con base en esta investigación, si se mezcla DFI con tierra y cemento agregando el OMC respectivo para mezclar, hidratar y compactar, no habrá necesidad de curar más.** De esta manera, **agregar DFI es mejor para la** estabilización de caminos de tierra, caminos de transporte, plataformas de pozos petrolíferos (para la industria del petróleo y el gas), estacionamientos, estabilización de subrasantes para caminos asfálticos, etc.

## 8. Recomendaciones para trabajos futuros

- Se necesita realizar un estudio detallado a nivel de microestructura para explicar más claramente el comportamiento de los suelos estabilizados con la adición de DFI, así como las reacciones químicas que ocurren debido a esta modificación. La formación de enlaces de partículas, junto con la evaluación de la formación de nuevos compuestos en función del tiempo, sería informativa.
- Se debe realizar una evaluación en profundidad del comportamiento de DFI en pruebas de congelación-descongelación y de humectación-secado según las normas ASTM para evaluar el comportamiento de DFI en estas condiciones ambientales. Estas dos pruebas son de gran importancia para las condiciones climáticas y ambientales del norte. Además, se debe realizar una prueba de congelación-descongelación a largo plazo para evaluar el comportamiento real en el campo en condiciones de congelación prolongada.

## 9. Agradecimientos

Los autores agradecen las contribuciones al proyecto de los colegas de la Universidad y Duraflex Global.

## 10. Contribuciones de los autores

Naveed Khan realizó los experimentos y escribió borradores del artículo bajo la guía de Nigel Shrive, quien adquirió los fondos y estableció los parámetros para el estudio, y editó el manuscrito.

## 11. Fuentes de financiación

Los autores agradecen el apoyo financiero de Duraflex Global y Mitacs para financiar este estudio. La Universidad de Calgary también ayudó a respaldar el proyecto.

## 12. Referencias

- [1] H. Dawood, N. Dawood, H. Fenby-Taylor, Y.-W. Chen, Desarrollo de un prototipo para optimizar el corte/relleno respaldado por BIM en el proceso de realización del sitio paisajístico., (2016).
- [2] H. Long, J. Zhai, Z. Zhang, Y. Zhao, K. Zhang, A. Zhang, Estudio sobre el efecto de la relación de escalón en el campo de temperatura de la transición de corte-relleno en la región de suelo congelado estacional profundo, Estudios de caso en ingeniería térmica 54 (2024) 104051. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104051>.
- [3] A.B. Ali, M. Rashid, Zahin Rahman, Tamjid Talukder, I.A. Joy, Un estudio comparativo sobre técnicas de estabilización del suelo, (2023). Español: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8088722>.
- [4] P. Kumar Vaddi, S. Dey, C.N. Bharath, U. Pallavi, Efectos de la bioenzima en las propiedades de resistencia del suelo, Química de materiales inorgánicos 3 (2024) 100047. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2024.100047>.
- [5] B. Indraratna, I. Sathananthan, C. Rujikiatkamjorn, A.S. Balasubramaniam, Modelado analítico y numérico de suelo blando estabilizado por drenajes verticales prefabricados que incorporan precarga por vacío, Int. J. Geomech. 5 (2005) 114–124. Español: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2005\)5:2\(114\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:2(114)).
- [6] A.E.A. Mostafa, M. Eisa, M.F. Ibrahim, Efecto de la estabilización de la capa de subrasante utilizando diversos aditivos en el diseño de pavimento flexible, Innov. Infrastruct. Solut. 9 (2024) 147. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01430-8>.
- [7] A.R. Ghanizadeh, M. Salehi, A. Mamou, E.I. Koutras, F. Jalali, P.G. Asteris, Investigación de los beneficios de la estabilización de la subrasante que prolongan la vida útil de los pavimentos flexibles mediante un análisis empírico-mecánico no lineal, Infraestructuras 9 (2024) 33. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9020033>.
- [8] S. Wang, L. Han, C. Wu, Y. Zhao, R. Zhang, Diseño de la proporción de la mezcla y optimización de la producción de piedra rellena con macadán estabilizado con cemento considerando la resistencia a la contracción y la fácil construcción, Construcción y materiales de edificación