

Perumin 35 Gestión Ambiental – Economía  
Circular Relaves

Trabajo técnico para el Foro de Tecnología,  
Innovación y Sostenibilidad – FORO TIS

Nano Tecnología HydraMetrix: Economía  
Circular en Relaves con un propósito de  
contención y estabilización física y química  
de las estructuras

Arturo Fahrenkrog Verschueren,  
MetrixPeru SAC, Perú, CEO,  
arturo@hydrametrix.cl +569 95092190

T.J. Brammer, ProSealCorp Inc., USA, Chief  
Executive Officer,  
tjbram@prosealcorp.com, +1 520 704 4010

## RESUMEN

Esta es una presentación técnica que aborda los lixiviados tóxicos y la inestabilidad de las estructuras de relaves mineros y/o estructuras de tierra. La lixiviación estructural y la inestabilidad crean en la minería serias preocupaciones de impacto ambiental, así como preocupaciones de seguridad de las partes interesadas, y una responsabilidad de pérdidas y ganancias financieras potencialmente extrema. La estabilidad hidrofóbica de los relaves y la contención de la unión de lixiviados tóxicos reducirán el impacto ambiental al tiempo que aumentan la seguridad geotécnica y la confianza de los stakeholders y disminuyen la responsabilidad por pérdidas y ganancias para la industria minera y fallas de estructuras de tierra. Se realizaron pruebas para determinar qué tecnología actualmente disponible podría reducir o unir los lixiviados y aumentar la integridad estructural hidrofóbica.

El cambio hacia una economía circular contribuye en la resolución de los conflictos sociambientales relacionados con el agua y minerales y las prácticas de economía circular ayudan al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. La transición a las energías limpias y la electromovilidad impulsará la demanda de minerales, tales como el Cobre para la Minería del Perú y se debe abordar la valorización y/o inertización de los residuos mineros como eje estratégico para la investigación, desarrollo, innovación y emprendimiento.

En todo el mundo, se utilizan 30 mil millones de toneladas de hormigón cada año. Sobre una base per cápita, eso es 3 veces más que hace 40 años, y la demanda de concreto está creciendo más abruptamente que la del acero o la madera. Una economía circular en base a la formación de hormigón desde los relaves

genera un impacto positivo con las comunidades, crea valor y administra el riesgo en la operación.

Se realizaron una serie de pruebas utilizando cemento Portland, geopolímeros y tecnología Nano Novel MetrixPeru como aditivos para relaves mineros. Las pruebas se realizaron utilizando los criterios de prueba de Atterberg, ASTM y TCLP. Algunas pruebas se modificaron para reflejar entornos de campo hostiles con mayor precisión.

Las pruebas fueron para determinar los límites líquidos, los límites de flujo, la plasticidad, la absorción de agua, la resistencia a la compresión, la restricción de lixiviados y la idoneidad general para la estabilización y contención de lixiviados de los suelos de relaves.

Cada material probado arrojó resultados diferentes: el cemento Portland produjo bajas resistencias a la compresión y propiedades hidrofílicas. Los geopolímeros produjeron mayores resistencias a la compresión y produjeron una mayor lixiviación. La tecnología Nano Novel MetrixPeru produjo mayores resistencias a la compresión, fuertes propiedades hidrofóbicas y propiedades de unión de lixiviados extremadamente sustanciales, unión y contenido por debajo de los límites TCLP de la EPA para siete de los 8 metales RCRA. No se determinó que un metal RCRA 8 estuviera presente en los relaves analizados.

## INTRODUCCIÓN

Mediante la economía circular se promueve el optimizar recursos, reducir el consumo de materias primas y el aprovechamiento de los residuos tales como relaves. La innovación propuesta genera valor, permitiendo una economía circular en relaves, reutilizando las arenas

lixiviadas en una propuesta que administra el riesgo en presas y relaveras.

La tecnología de innovación no modifica procesos productivo de Fe y Cu para las empresas mineras, ideal para el tratamiento de relaves de diferentes minerales y procesos.

La arena de sílice para hormigón es un recurso no renovable que se agota rápidamente. La tecnología Nano Novel HydraMetrix es una nueva tecnología de partículas avanzada. Los relaves mineros son preocupaciones ambientales históricas y actualmente presentes en las principales operaciones mineras e inmersos en las comunidades aledañas, los costos hundidos representan una responsabilidad de la industria de manera inminente. Presentamos a continuación una solución; la concepción, la aplicación, las pruebas y los resultados de las mezclas que se aplican en la tecnología Nano Novel HydraMetrix como una solución para disminuir el desafío de la arena de sílice en base a un principio de economía circular y como una solución para capturar el costo hundido y reducir el potencial de responsabilidad de los relaves mineros. La tecnología Nano Novel HydraMetrix logra esto debido a las propiedades, solo disponibles a nanoescala y más pequeñas, creando miles de millones de reacciones más en la misma huella.

#### METODOLOGÍA

Tras la conceptualización, se consideró la necesidad de determinar las características requeridas para cumplir con el desempeño del hormigón desde relaves y exponer las limitaciones tecnológicas de acuerdo con las pruebas USACE ASTM y EPA TCLP para materiales cementados. Se realizan pruebas de resistencia; compresión, tracción por flexión, tracción por división, tracción directa y corte triaxial y complementariamente pruebas de límites líquidos, plasticidad, asentamiento, lixiviados tóxicos, tiempos de fraguado e hidrofobicidad.

#### 1.0 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS DE HORMIGÓN: ASTM C09/C109-90

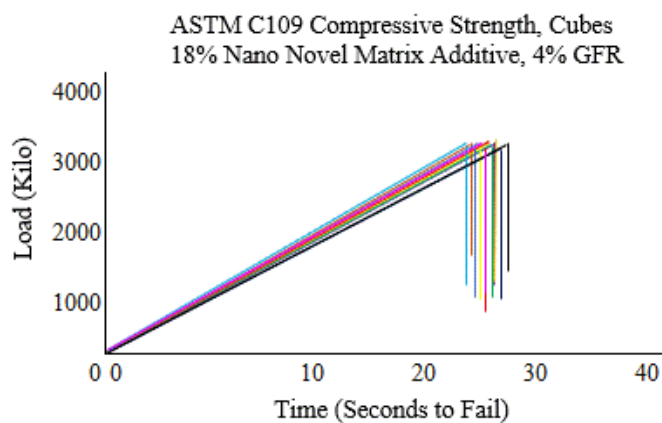


Figure 1

#### 1.1 Resultado

El aditivo Nano Novel HydraMetrix al 18 % con GFR al 4 % no superó la carga/tensión mínima para el mortero y logró 13,89 MPa, Figura 1, arriba. El aditivo Nano Novel HydraMetrix con 4 % de GFR aprobó la carga/tensión mínima para mortero. Esta prueba de material cumple o supera los criterios concretos de tipo I generando valor conceptual a la formulación de utilización de relaves para la generación de hormigón.

#### 2.0 RESULTADOS COMBINADOS DE RESISTENCIA ASTM

Los especímenes cilíndricos como aditivos Nano Novel HydraMetrix mezclados al 23 %. Resistencia a la compresión: ASTM C39/C39M-21 Resistencia a la tracción por flexión ASTM C293, Resistencia a la tracción por división C496, Resistencia a la tracción directa D 2936, Figura 2, página 3.

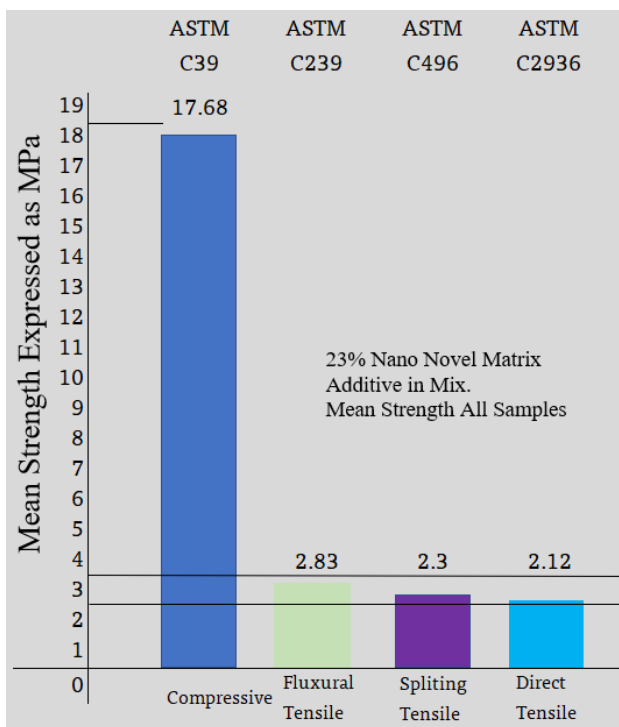


Figure 2

## 2.1 Resultados

El rango aceptable de ASTM para concreto en ASTM C39 es de 17 a 11 MPa, mientras que ASTM C293, ASTM C 496 y ASTM C 2936 están en el rango de 2 MPa a 5 MPa. Las muestras del 23 % del aditivo Nano Novel HydraMetrix aprobaron las normas ASTM C 39, C239, C 496 y C 2939. Más estudios, diseños y pruebas de matriz pueden crear mayores fortalezas en esta formulación de matriz, generando un alcance de administración del riesgo para cimentar presas o lamas con potencial falla geotécnica por efecto de licuefacción.



Figura 1



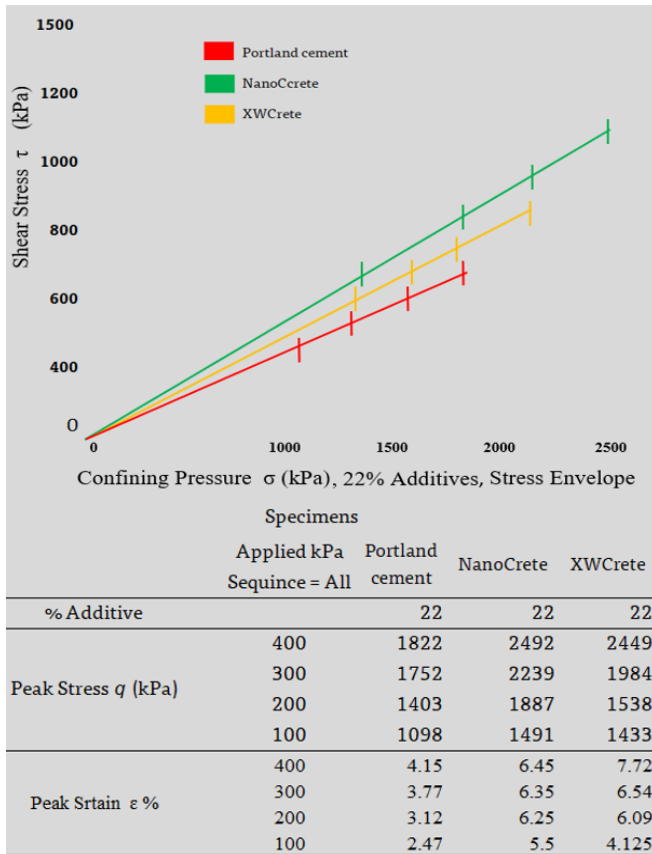
Figura 2



Figura 3

Encima de las figuras 1, a la izquierda, material en agua completamente sumergido durante 8 años y sin descomponerse. Figura 2, camioneta en TSF Relaves sobre estabilización física colocada in situ, que permite además el control de polvo y lodo. Figura 3, Nano innovación de hormigón alternativo tipo 1 con núcleo.

### 3.0 CORTE TRIAXIAL COMPARATIVO SIN CONSOLIDADO, SIN DRENAJE NANO NOVEL HYDRAMETRIX vs CEMENTO PORTLAND ASTM D2850 – 03



#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Esfuerzo y deformación en el estrés máximo

La tensión máxima y la deformación en el promedio de tensión máxima alcanzan una mayor resistencia a la destrucción en los tipos de muestra Nano Novel HydraMetrix frente a la resistencia destructiva promedio de las muestras de cemento Portland. Con cambios en la presión de confinamiento, la resistencia máxima a la tensión del aditivo Nano Novel HydraMetrix/GFR aumenta en el suelo entre un 24 % y un 43 % en comparación con el cemento Portland. La

tensión máxima de resistencia a la deformación de Nano Novel HydraMetrix/GFR, aumenta el rango del 110 % al 160 % sobre el cemento Portland. La resistencia a la modificación del efecto de destrucción de Nano Novel HydraMetrix/GFR aumenta con el aumento de la presión de confinamiento. La ductilidad de las muestras de Nano Novel HydraMetrix/GFR mejora significativamente con respecto al cemento Portland.

Después de alcanzar el estrés máximo, los resultados de las pruebas muestran que el estrés se reduce gradualmente con una mayor tensión. Esto confirma que las muestras aún tienen cierta resistencia para soportar la fuerza interna y son útiles para los modelos de falla dúctil después de alcanzar el estrés máximo, Figura 3, arriba.

##### 3.1.2 Valor de tensión con 10 % de deformación axial

Esto se conoce como  $q_{0.1}$ . El contenido de aditivo se fija en 22%, todas las muestras  $q_{0.1}$  aumentan la resistencia con el aumento de la presión de confinamiento. Bajo la misma presión de confinamiento, todas las muestras  $q_{0.1}$  primero aumentan y luego disminuyen en resistencia destructiva cuando la tensión residual alcanza el máximo: las muestras de cemento Portland  $q_{0.1}$  aumentan levemente; las muestras Nano Novel HydraMetrix aumentan la resistencia a la destrucción en promedio, entre un 98 % y un 110 % más que el cemento Portland con cambios en la presión de confinamiento. Los aditivos Nano Novel HydraMetrix en el suelo de relaves mejoran en gran medida la resistencia a la destrucción. Los suelos de cemento Portland ganan resistencia destructiva nominal sobre los suelos naturales, Figura 3, página 4.

##### 3.1.3 Curva de fuerza

Para dibujar una envolvente de resistencia de todas las muestras aditivas y obtener sus parámetros de resistencia: el pico de  $q$  es el punto de falla, donde  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ; el estrés normal es abscisa; el esfuerzo cortante es ordenado;  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  es el centro y  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  es el radio en la abscisa. El diagrama de tensión última se dibuja en el gráfico de plan de tensión  $\tau$ - $\sigma$ , que no se muestra. Se dibuja la envolvente del círculo de tensión última bajo diferentes presiones de confinamiento; Los parámetros de resistencia  $c$  y  $\phi$  de las muestras se obtienen de la envolvente de resistencia, en la tabla de la Figura 3, página 4. Gráfico de envolvente de resistencia, no mostrado.

Para estudiar las características de fragilidad de las muestras durante la falla, se emplea el índice de fragilidad como criterio de evaluación, como se muestra en la Ecuación 1, a continuación:

$$I = (q_{\text{máx}} / q_{0.1})^{-1}$$

donde  $q_{\text{máx}}$  y  $q_{0.1}$  representan la tensión máxima y la tensión al 10 % de deformación axial, respectivamente; “ $I$ ” representa el índice de fragilidad.

### 3.1.4 Índice de fragilidad

El índice de fragilidad de todas las muestras alcanza su valor más alto a una presión de confinamiento de 100 kPa, y la falla por fragilidad es obvia; El índice de fragilidad de todas las muestras alcanza su valor más bajo a una presión de confinamiento de 400 kPa. Las muestras de Nano Novel HydraMetrix se representan con mayor resistencia a la fragilidad que el cemento Portland, lo que infiere que Nano Novel HydraMetrix demuestra el efecto dominante para la mitigación de la falla por fragilidad. Bajo la misma presión de confinamiento, el estrés y la deformación de todas las muestras primero disminuyen y luego aumentan a una relación de 22 % Nano Novel HydraMetrix: 4 % GFR: 74 % Tierra de relaves. El índice de fragilidad de las muestras con contenido de Nano Novel HydraMetrix alcanza márgenes aceptables.

Las muestras de suelo de relaves/cemento Portland no alcanzan márgenes similares en comparación con las muestras de suelo de relaves naturales con 0% de aditivos. El índice de fragilidad de Nano Novel HydraMetrix disminuye del 52 % al 79 % con el aumento de la presión de confinamiento sobre las muestras de cemento Portland/suelo de relaves, lo que indica que la incorporación de Nano Novel HydraMetrix mejora la falla por fragilidad de la muestra y el efecto de modificación aumenta con el incremento de la presión de confinamiento. Estos dos sucesos, resultantes del cambio de la presión de confinamiento, crean una fuerza de interacción interfacial entre Nano Novel HydraMetrix y las partículas del suelo de relaves. Cuando la masa se somete a una fuerza externa, el aditivo Nano Novel HydraMetrix soportará una parte de la fuerza externa a través de la interacción interfacial, mejorando la falla por fragilidad de la muestra.

## 4. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DE CONTENCIÓN DE FIJACIÓN DE LIXIVIADOS TÓXICOS – PRUEBAS TCLP

Tabla 1

RCRA 8 Metals	Units	USA EPA Tailings Leachates Allowable Limits							
		AG Silver	AS Arsenic	Ba Barium	Cd Cadmium	Cr Chromium	Hg Mercury	Pb Lead	Se Selenium
Common Range Natural Soils	mg/kg	0.6	50;1-40 <sup>10</sup>	100-3,000 <sup>10</sup>	.01-70,000	5-3,000	.01-30	2.0-200	.10-20
Hazardous Waste Screening Criteria (TCLP0)	mg/kg	100.00	100.00	2,000.00	20.00	100.00	4.00	100.00	20.00
TCLP Hazardous Waste Limits	mg/L	5.00	500.00	100.00	1.00	5.00	0.20	5.00	1.00
ICP-IEOS Analysis Leach Results from Nano Novel Matrix additives mixed (23%) with Mine Tailings									
Tailings Type	in ppb	AG	AS	Ba	Cd	Cr	Hg	Pb	Se
FE Raw Tailings		1.00	1.32	100.12	0.11	2.10	0.00	2.30	1.20
FE w/ Nano Novel Matrix additive 23%		0.014	0.05	0.033	0.01	0.0068	0.00000	0.015	0.002
% Change		99%	96%	100%	91%	100%	N/A	99%	100%
Change +/-		+	+	+	+	+	N/A	+	+

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Método modificado

El Dr. Jeaheon Lee de la Universidad de Arizona y Director del Centro para la

Excelencia en Relaves de la Escuela de Minería de Colorado modificó nuestro TLCP; bajó el pH a 3,0, usó ácido sulfúrico en lugar de ácido 3,04 y aumentó la exposición a 30 días frente a 72 horas. En ladrillos de arenas de relaves retirados desde las lamas, uno de cada uno, tanto relaves de Fe y Cu probados bajo protocolos TLCP modificados: suelos probados para pH; proporción de solución mixta 100 g suelo: 2000 ml pH 3,0 ácido sulfúrico, solución de agua DI; revuelto durante 18 horas; especímenes extraídos; filtrado, separando la materia de la solución; sometido a análisis de plasma acoplado inductivo (ICP); probado para el contenido. Procedimiento repetido cada 24 horas durante 30 días.

#### 4.1.2 Resultados

Ladrillos generados con arenas de relaves retirados de las lamas y depósitos de tipo TSF (Tailings Storage Facilities), uno de cada uno de Fe y Cu; solución filtrada, separando la materia de la solución; especímenes extraídos; sometido a análisis de plasma acoplado inductivo (ICP); probado para contenido, resultados en ppb, Tabla 1, arriba. Resultados de contención de lixiviados, suelos de relaves tratados con tecnología Nano Novel HydraMetrix, iguales o muy por debajo de los límites de contención de lixiviados del TLCP de la EPA. El tamaño de partícula nano y sub-nano accede a una mayor área de superficie para enlaces en la misma huella, creando más sitios de enlace, por lo tanto, una compactación más estrecha. Las propiedades hidrofóbicas de la tecnología Nano Novel HydraMetrix impiden la hidratación del agua de la masa. Una vez que se cura la masa, la restricción del agua disponible impide que se produzcan intercambios químicos básicos que crean propiedades ácidas a partir de ciertos minerales o la descomposición de la biomasa en el suelo que rompe los enlaces poliméricos. (Brammer, Piedra, 2020

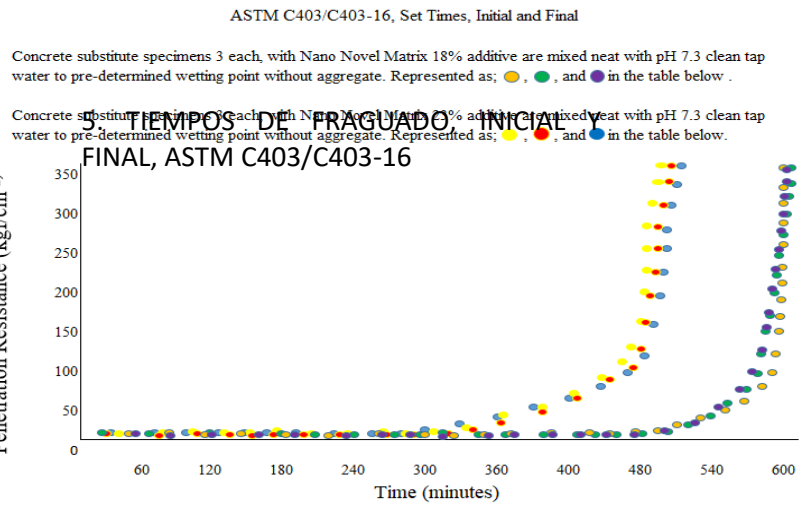


Figura 4

#### 5.1 Resultado

Los tiempos iniciales de fraguado estuvieron dentro de los estándares ASTM aceptados para el hormigón de cemento Portland para un desempeño de 600 minutos. Alternativa de hormigón Nano Novel HydraMetrix con un 18 % de aditivo en los tiempos iniciales de fraguado + 480 minutos; tiempo de fraguado final 600 minutos; aprobó los estándares mínimos de ASTM para concreto, Figura 4, arriba. Debido al tamaño de los lotes de mezcla, se requiere trabajo para desarrollar grandes lotes de mezcla con menor actividad exotérmica.

#### 6.0 DISCUSIONES/CONCLUSIONES

Los tamaños de los lotes de muestra relaves de la tecnología alternativa de hormigón Nano Novel HydraMetrix pasaron todos los criterios relevantes para el cemento tipo I.

El rango de costos por yarda cúbica de concreto, en los EE. UU., actualmente es de US\$117 a US\$144 y todos los indicadores indican que el precio está aumentando. Se estima que el material alternativo de hormigón Nano Novel HydraMetrix en su primera generación actual cuesta USD \$ 238 por yarda cúbica. Con tasas de producción más eficientes y a mayor escala, estimamos que este material estará casi a la par con el concreto de arena de sílice y cemento Portland, pero con una huella de carbono mucho menor generando un impacto positivo frente al análisis de cero emisión que busca la industria minera a nivel Global. Actualmente se están realizando pruebas para alternativas de hormigón Tipo II que utilizan aditivos Nano Novel HydraMetrix. La adaptación de la tecnología Nano Novel sin duda aumentará positivamente el impacto ambiental y la imagen ambiental de cualquier empresa ya que el propósito corresponde a la implementación de una Economía Circular que genera valor a la operación y a las partes comprometidas. La economía circular permite reinventar y rediseñar el sistema minero y en especial el de los relaves y crear un ambiente eco-sostenible y equitativo, al servicio de las personas y del bienestar del planeta. Hoy la economía circular acoge la posibilidad de integrar cada vez más la igualdad y la resiliencia en este modelo de reutilización de relaves y cimentación de presas administrando el riesgo geotécnico de las complejas mega estructuras.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dr. Jaeheon Lee University of Arizona and Director at The Center for Tailings Excellence, USA.
2. Dr Priscila Nelson Colorado School of Mining and The Center for Tailings Excellence, USA.

#### REFERENCES

1. Abdoulaye A. & et al 2018. Stability of a new geopolymer grout: Rheological and Mechanical Performances of Metakaolin-Fly Ash Binary Mixtures Construction and Building Materials Volume 18: 420-436.
2. Abdullah M.M.A.B. & et al. 2014. Characterization of Soils as Potential Raw Materials for Soil Stabilization Application Using Geopolymerization Method Department of Interior: 135-143.
3. Asta M et al 2020. Inorganic Nano Particles – Unique Properties and Novel Applications Millipore Sigma, Material Matters Volume 2 Issue 1.
4. ASTM 2C31/6 31m and ASTM C42/6 42m. Making and Curing Specimens American Standard Test Methods Manual.
5. ASTM C39. Compressive Strength, American Standard Test Methods Manual.
6. ASTM C642. Absorption and Density, Strength American Standard Test Methods Manual.
7. Brammer T 2020, Nano Inorganic Technology: Bind & Contain RCRA 8 Metals and Tailings, Tailings and Mine waste, Colorado State University of British Columbia, White Paper.