

CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE ENSAYOS DE COMPRESIÓN
UNIAXIAL NO CONFINADO (UCS), RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
INDIRECTA (BTS) Y ENSAYOS DE CARGA PUNTUAL (PLT)

Miguel Vera Barrientos

Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería en Minas
Laboratorio de mecánica de rocas
Universidad de Santiago de Chile
Miguel.vera@usach.cl
56-227182116; 56-227183075

Ramiro León Fagnilli

Ingeniero en Minas, Departamento de Ingeniería en Minas
Laboratorio de mecánica de rocas
Universidad de Santiago de Chile
ramiro.leon@usach.cl
56-227182116; 56-227183075

Resumen

Las virtudes de los resultados de un ensayo de compresión uniaxial sin deformación son relevantes en la determinación de las propiedades de la roca. El presente estudio trata de resolver en forma empírica, a través de correlaciones entre el ensayo de carga puntual, $I_s(50)$, (PLT) que es un método útil para la estimación de la resistencia de las rocas, considerado por su fácil preparación de muestras, su bajo costo y además el ensayo de tracción indirecta o ensayo brasilero, (BTS) ambos en función del ensayo de compresión.

Existen normas internacionales como ASTM D5731-14, D7012-14 y D3967-08 que nos entregan una pauta como realizar los procedimientos.

El estudio encontró las correlaciones entre los ensayos $I_s(50)$ PLT y BTS respecto de los datos de UCS para un tipo de roca definida como brecha sub volcánica de composición riolítica de la cordillera de los Andes Central, obteniendo un error promedio del 0,15% para el primer caso, para el caso de la tracción indirecta el error aumenta a un 0,43%. Los autores establecen que las características del $I_s(50)$ en función del UCS se marca específicamente por las propiedades de las físicas de las rocas secas.

1.0 Introducción

La resistencia a Compresión Uniaxial No Confinado (UCS) y a la Tracción Indirecta (BTS) son propiedades claves para la caracterización de material de roca. El Índice de resistencia de Carga Puntual (PLT), se ha correlacionado empíricamente tanto para la resistencia a compresión como para la resistencia a la tracción de roca. El ensayo de carga puntual (PLT) se puede aplicar a especímenes cilíndricos, ya sea a lo largo del eje, o del diámetro, se prefiere realizar PLT diametral. El ensayo PLT, las muestras de roca son cargadas entre dos placas cónicas y truncadas de contacto puntual, y fallan por el desarrollo de uno o más planos extensionales contenidos en la línea de carga. De acuerdo a las recomendaciones de ISRM (1985) y ASTM D5731-14, estos tipos de falla se consideran válidos, mientras que sus desviaciones son consideradas no válidas.

El ensayo UCS sin determinación de módulos consume tiempo y dinero, requiere buena preparación de las muestras y un sistema logístico importante. Por otro lado, el ensayo BTS requiere una simple preparación de muestras. Para ambos ensayos los equipos y elementos necesarios sólo se operan en laboratorio y no es posible de realizar la experiencia en terreno. Debido a esto, ensayos indirectos como PLT, esclerómetro, velocidad de ondas son recurrentes para predecir la resistencia a la Compresión Uniaxial no Confinado (UCS) y Tracción Indirecta (BTS).

En la actualidad existen diversas ecuaciones de regresión tanto para resistencia a la compresión uniaxial no confinada como para tracción indirecta en base al ensayo de carga puntual. Todos ellos concluyen que los factores asociados al tipos de roca en su composición influyen en el resultados de los ensayos, al usar las diferentes ecuaciones se observa una baja correlación y en algunos casos poca confianza en los resultados. Con la experiencia ya adquirida en distintos laboratorios a nivel mundial se decide realizar una evaluación específica con una roca de tipo Brecha sub volcánica de composición Riolítica, conformada en su parte superior por flujos de brechas tobaceas soldadas y pórfido riolítico. Esta roca se encuentra en una chimenea riolítica como un gran cuerpo circular de una dimensión que contiene numerosas fases de intrusiones félsicas que se emplazan en sectores con mineralización del sector Rio Blanco (serrano et al, 1996).

El objetivo es obtener ecuaciones de regresión típicas para esta zona y se enmarca en un proyecto minero de la zona central de Chile. Estas ecuaciones de regresión son para determinar la resistencia a la tracción indirecta y a la compresión uniaxial sin deformación, en función del índice de resistencia a la carga puntual y sus parámetros asociados.

El impulso para la realización de este trabajo radica en que los estudios bibliográficos actualmente vigentes, que correlacionan y determinan los valores de UCS y BTS en base a PLT, son desarrollados principalmente con muestras de roca pertenecientes a otros lugares del mundo. Se apunta a corregir estos resultados teniendo en cuenta la distribución de los componentes en la roca, tipos de fallas y estructuras, litología entre otros factores.

Objetivo principal

Determinar en base al Índice de Carga Puntual la relación existente con los ensayos de resistencia a la Compresión Uniaxial sin deformación y Resistencia a la tracción Indirecta. Para esto se realizan los tres ensayos y se busca la correlación que se produce con el Índice de resistencia de Carga Puntual de rocas en estado seco por método diametral. Encontrar otro tipo de relaciones de acuerdo a la bibliografía existente.

2.0 Fundamentos teóricos

Las correlaciones entre UCS y PLT, las cuales han sido generales y variables respecto a factores como el tipo de roca, lugar geográfico, litología, diámetro de la muestra. Un resumen de autores con sus ecuaciones publicadas se puede visualizar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Ecuaciones de regresión para determinar UCS utilizando $Is(50)$, [MPa].

Referencia	Ecuación de Correlación
D'Andrea et al. (1964)	$UCS = 15,3 Is(50) + 16,3$
Deere and Miller (1966)	$UCS = 20,7 Is(50) + 29,6$
Singh (1981)	$UCS = 18,7 Is(50) - 13,2$
Gunsallus and Kulhawy (1984)	$UCS = 16,5 Is(50) + 51,0$
Cargill and Shakoor (1990)	$UCS = 23 Is(50) + 13$
Grasso et al. (1992)	$UCS = 25,67 [Is(50)]^{0,57}$
Tsiambaos and Sabatakakis (2004)	$UCS = 7,3 [Is(50)]^{1,71}$
Ulusay et al. (1994)	$UCS = 19 Is(50) + 12,7$
Kahraman (2001)	$UCS = 8,41 Is(50) + 9,51$
Quane and Russel (2003)	$UCS = 3,86 [Is(50)]^2 + 5,62 Is(50)$
Fener et al (2005)	$UCS = 9,08 Is(50) + 39,32$
Broch and Franklin (1972)	$UCS = 24 Is(50)$
Bieniawski (1975)	$UCS = 23 Is(50)$
Hassani et al. (1980)	$UCS = 29 Is(50)$

Así mismo, ha sucedido con los estudios de correlación entre BTS y PLT. Que podemos observar en la Tabla 2.2

Tabla 1.2 Ecuaciones de regresión para determinar BTS utilizando $Is(50)$, [MPa].

Referencia	Ecuación de Correlación
Diyuan Li y Louis Wong (2012)	$BTS = 0,94 Is(50)$
	$BTS = 0,66 Is(50)$
M. Heidari et al (2011)	$BTS = 1,77 Is(50) + 2,57$
	$BTS = 2,90 Is(50) + 1,10$
Saffet Yagiz (2013)	$BTS = 0,88 Is(50)$
	$BTS = 0,67 Is(50)$

En las referencias bibliográficas se han encontrado también unas correlaciones entre UCS y BTS, tal como lo publica (E.T. Mohamad et al (2014)) en la Tabla 2.3. Nuestros estudios se vieron incrementados al encontrar la relación entre BTS y UCS y su igualación al factor m_i de Hoek-Brown.

Tabla 2.3 Ecuaciones para la determinación de UCS en función de BTS

Referencia	Ecuación de regresión	R o R ²	Tipo de roca
Kahraman et al. (2012)	UCS = 10.61BTS	R ² = 0,54	Diferentes tipo de roca incluyendo caliza
Farah (2011)	UCS = 5.11 BTS - 133.86	R ² = 0,68	caliza meteorizada
Gokceoglu and Zorlu (2004)	UCS = 6.8 BTS + 13.5	R = 0,65	-
Altindag and Guney (2010)	UCS = 2.38 [BTS] ^{1.0725}	R = 0,89	Diferentes tipo de roca incluyendo caliza
Nazir et al. (2013)	UCS = 9.25 [BTS] ^{0.947}	R ² = 0,90	muestras de caliza

3.0 Realización de los ensayos

3.1 Ensayo del índice de resistencia a la carga puntual

Consiste en determinar el Índice de Resistencia a la Carga Puntual (PLT) en muestras de roca, ya sea en probetas de forma axial o diametral, o bien en muestras irregulares. Índice de resistencia a la carga puntual no corregido, (I_s): Corresponde al indicador de resistencia obtenida sometiendo una muestra de roca a una carga puntual concentrada, aplicada a través de un par de placas cónicas truncadas, hasta que se produzca la fractura. Índice de resistencia la carga puntual corregido, $I_{s(50)}$: Corresponde al valor original de la resistencia a la carga puntual estandarizado para muestras con diámetro de 50mm. En Figura 3.1 se tiene un equipo de carga puntual en el lado izquierdo y las probetas ensayadas al lado derecho. Figura 3.2 se muestra el almacenamiento fotográfico de una probeta con su registro cada 120 grados.

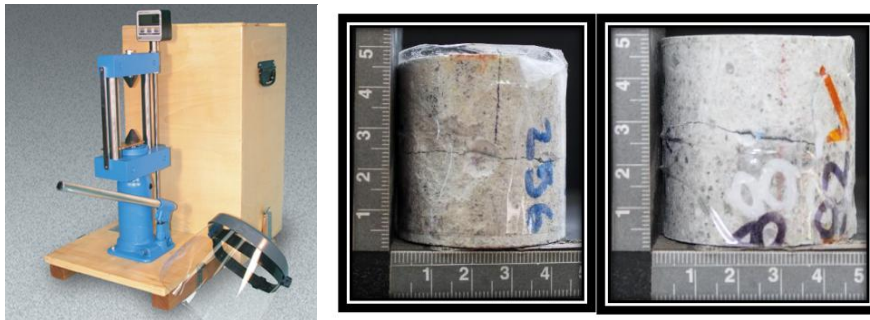


Figura 3.1 maquina de ensayo de carga puntual y probetas ensayadas mediante PLT



Figura 3.2 Registro fotográfico cada 120 grados de una probeta de roca para ensayo PLT.

3.2 Ensayo de resistencia a la Tracción Indirecta

El ensayo brasilero (BTS) mide la resistencia a la tracción indirectamente por la aplicación de una tensión a través del diámetro de un disco de roca que se somete a compresión a través de una carga vertical. Este se realiza con una mordaza estandarizada sobre el disco. En la figura 3.3 se muestra el posicionamiento de la mordaza al interior de la prensa. En la Figura 3.4 se observa las probetas ensayadas con una ruptura por tracción caso izquierdo y tracción- cizalle lado derecho

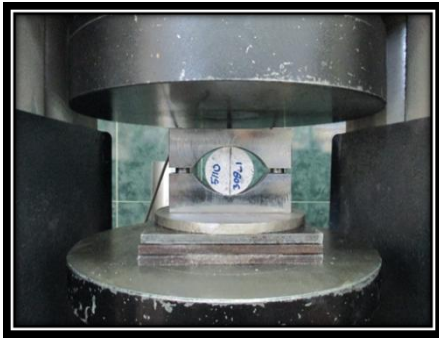


Figura 3.3 Posicionamiento de la mordaza al interior de la prensa de compresión para el ensayo BTS

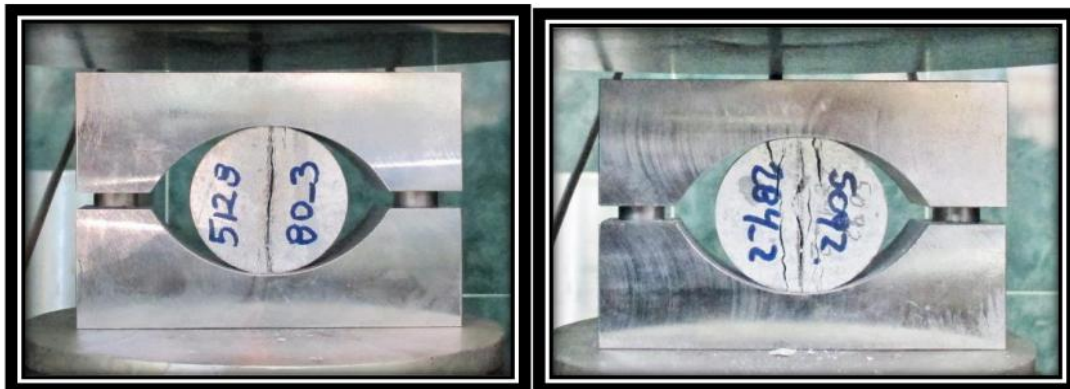


Figura 3.4 Probetas ensayadas mediante el método Brasilerio (BTS) izquierda muestra valida, derecha muestra no valida

3.3 Ensayo de compresión uniaxial sin deformación

El ensayo UCS se enmarco bajo la norma ASTM 7012-14, estos fueron realizados en dos etapas, los primeros ensayos se trabajaron para desarrollar los criterios de falla de Hoek & Brown, los finales se utilizaron para comparar sus resultados con PLT y BTS, los parámetros geométricos de la relación largo de diámetro llegaron a 2,2 veces, se trabajó en una maquina servo asistida AUTOMAX 5 CONTROLS con una capacidad de 2000 kN, la velocidad de carga fue de 0,5 MPa /s, sensibilidad de 15 kN, los resultados de la preparación se pueden ver en la Tabla 3.1. Para el caso de los ensayos de discos (BTS) la relación diámetro espesor llego a 0,5 veces, con velocidades de carga de 0,05 Mpa/s, sensibilidad de 0,05 kN.

Dentro del desarrollo experimental en su preparación se ocuparon los siguientes criterios de corte de muestras

- Probetas (UCS): El largo será 2 a 2.5 veces su diámetro.
- Probeta (PLT): El largo será mayor a 1 vez su diámetro.
- Disco (BTS): Su espesor será 0.25 a 0.75 vez su diámetro.

Los criterios de rectificado, está establecido que el grado de rectificación de las caras de una probeta, deberá ser medido en una superficie rectificada con tolerancia de 0.01mm.

Para muestras de tipo probetas, se emplea un grado de tolerancia para su superficie no mayor a 0.5mm

Tabla 3.1 Valores obtenidos de las muestras válidas en los ensayos PLT, UCS y BTS.

Muestra (N°)	PLT _s (kN)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
M1	9,038	56,32	4,51
M2	12,568	75,42	6,52
M3	10,678	77,52	6,65
M4	5,798	86,51	7,73
M5	15,69	93,21	8,15
M6	15,032	106,85	8,3
M7	8,764	107,64	9,07
M8	10,754	114,98	9,7
M9	9,418	117,32	10,14
M10	14,41	132,8	10,44
M11	16,182	149,51	10,71

Para el caso particular se tiene la relación entre los ensayos de compresión uniaxial (UCS) y de tracción indirecta (BTS), en donde es posible relacionar estos con el parámetro “m_i”, de la ecuación de Hoek & Brown utilizada para la caracterización de roca intacta.

Hoek-Brown (1980), propuso un criterio para estimar el esfuerzo de ruptura del macizo rocoso a través de la realización de ensayos triaxiales y una caracterización del macizo rocoso, este criterio ha sido ampliamente utilizado por más de 30 años a nivel mundial, obteniendo buenos resultados.

La ecuación de Hoek-Brown para roca intacta se define como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

Donde σ_1 y σ_3 representan el mayor y menor esfuerzo principal respectivamente, m_i es una constante que depende de la roca intacta, σ_{ci} es el esfuerzo a la compresión uniaxial.

La constante a estudiar m_i es normalmente obtenida de un grupo de ensayos triaxiales con distintos confinamientos. El valor de m_i depende de las características de la roca, de los minerales presentes en ella, de la textura y tamaño de grano, es decir su determinación debe ser única para cada tipo de roca a estudiar.

Una aproximación al valor de la constante m_i se puede obtener sin necesidad de realizar ensayos triaxiales, considerando que es igual a la razón entre σ_{ci} y σ_t como se muestra en la ecuación 3.2, siendo σ_t la resistencia a la tracción indirecta por medio de ensayo brasilero.

$$m_i = \frac{UCS}{BTS} \quad (3.2)$$

4.0 Resultados

De una serie de ensayos triaxiales llevados a cabo con distinto confinamiento se obtiene como resultado una constante m_i igual a 12.48, a la vez en la tabla 4.1 se muestran los resultados de once ensayos UCS y BTS a la misma litología, obteniendo la razón UCS/BTS en cada uno de ellos.

Finalmente se obtiene como resultado para esta relación un m_i con un valor de 12.34, el cual presenta un error de 1.11% con respecto al obtenido de ensayos triaxiales.

Además de la similitud de los resultados el método entrega una forma rápida y sencilla de obtener esta constante, debido principalmente a la simplicidad de los ensayos involucrados y al menor costo de estos.

Tabla 4.1: Valores ensayo UCS y BTS y relación UCS/BTS

Muestra (N°)	UCS(50) (MPa)	BTS(50) (MPa)	UCS/BTS
M1	58.59	4.41	13.29
M2	74.62	6.4	11.66
M3	76.78	6.51	11.79
M4	85.62	7.58	11.30
M5	92.31	7.99	11.55
M6	105.74	8.15	12.97
M7	106.47	8.91	11.95
M8	113.87	9.5	11.99
M9	122.05	9.94	12.28
M10	131.53	10.24	12.84
M11	148.09	10.5	14.10
Media	101.42	8.19	12.34

En nuestra segunda etapa de trabajo durante el procedimiento experimental se recogieron 60 muestras de roca de varios lugares de la zona en estudio. Para el ensayo UCS se preparan 11 muestras, en el de carga puntual 20 muestras y en el ensayo de tracción indirecta 29 muestras. Sin embargo, se validaron 11 muestras por cada tipo de ensayo para analizar su correlación. Los resultados encontrados se reflejan en la tabla 4.2. La preparación de las muestras cilíndricas y discos son en base a testigos con diámetro de 47.6mm (tamaño NQ), con proporciones similares de longitud a diámetro (L/D). El ensayo UCS se lleva a cabo sobre muestras cilíndricas (L/D= 2.3) en condición seca siguiendo las recomendaciones de la norma ISRM (1981). Para los ensayos de tracción indirecta, los discos se obtuvieron a partir de los restos de testigos utilizando la sierra. En la prueba de carga puntual, las probetas (L/D>1) se sometieron al método diametral en condición seca.

Tabla 4.2 Resultado de ensayos de Valores normalizados a muestras con corrección del diámetro a 50 mm.

Muestra (N°)	PLTI ₍₅₀₎ (MPa)	UCS ₍₅₀₎ (MPa)	BTS ₍₅₀₎ (MPa)
M1	2,36	58,59	4,41
M2	3,51	74,62	6,40
M3	3,77	76,78	6,51
M4	3,91	85,62	7,58
M5	4,05	92,31	7,99
M6	4,62	105,74	8,15
M7	5,35	106,47	8,91
M8	5,42	113,87	9,50
M9	6,17	122,05	9,94
M10	6,46	131,53	10,24
M11	6,97	148,09	10,50

Se puede ver en las figuras 4.1 y 4.2 las relaciones entre los datos o valores de UCS y BTS sobre los valores de PLT. Llegando a reflejar las siguientes ecuaciones mostradas en la tabla 4.3 donde se encuentran coincidencias con algunas referencias como "Ulusay et al. (1994)" los coeficientes son altos y los resultados son validados por la faena minera que los solicitó. Como una confirmación de los datos expuestos en las figuras 4.3 y 4.4 se grafican los valores reales de UCS versus los generados por las ecuaciones obtenidas en resultados anteriores.

Tabla 4.3 Ecuaciones de regresión y determinación del coeficiente R^2 en base a $Is(50)$.

Parámetros en comparación	Ecuación de regresión	R^2
Resistencia a la Compresión Uniaxial e Índice de resistencia a la carga puntual.(MPa)	$UCS = 18.66 Is_{(50)} + 12.23$	0.97
Resistencia a la Tracción Indirecta e Índice de resistencia a la carga puntual.(MPa)	$BTS = 1.29 Is_{(50)} + 2.01$	0.95

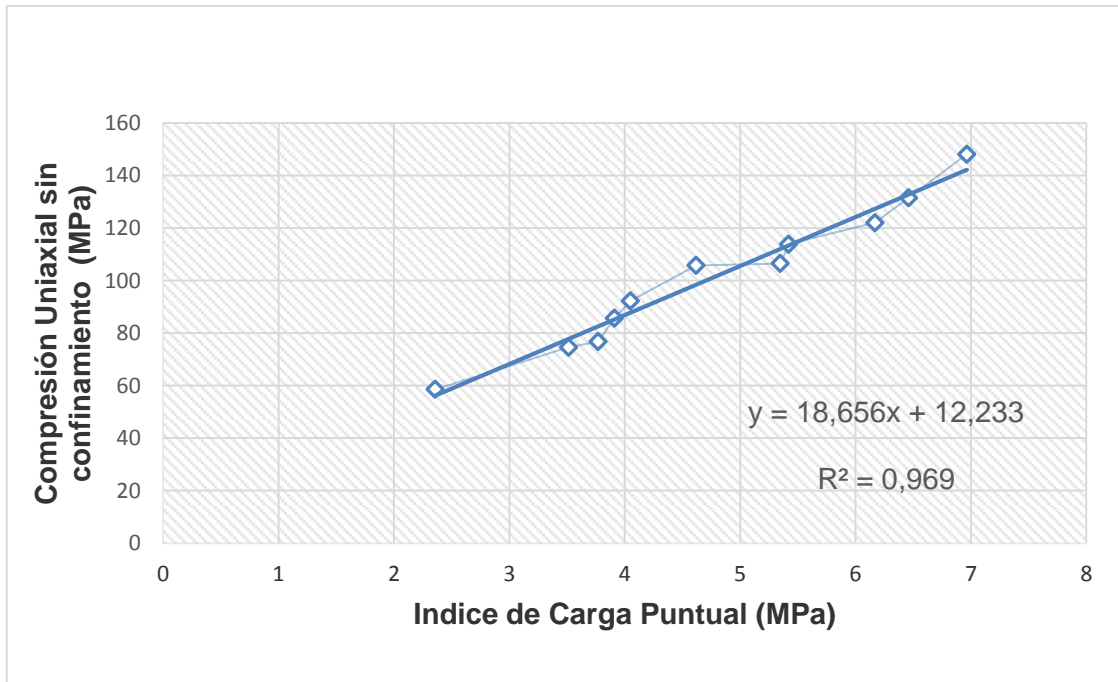


Figura 4.1 Correlación entre Ensayos PLT y UCS

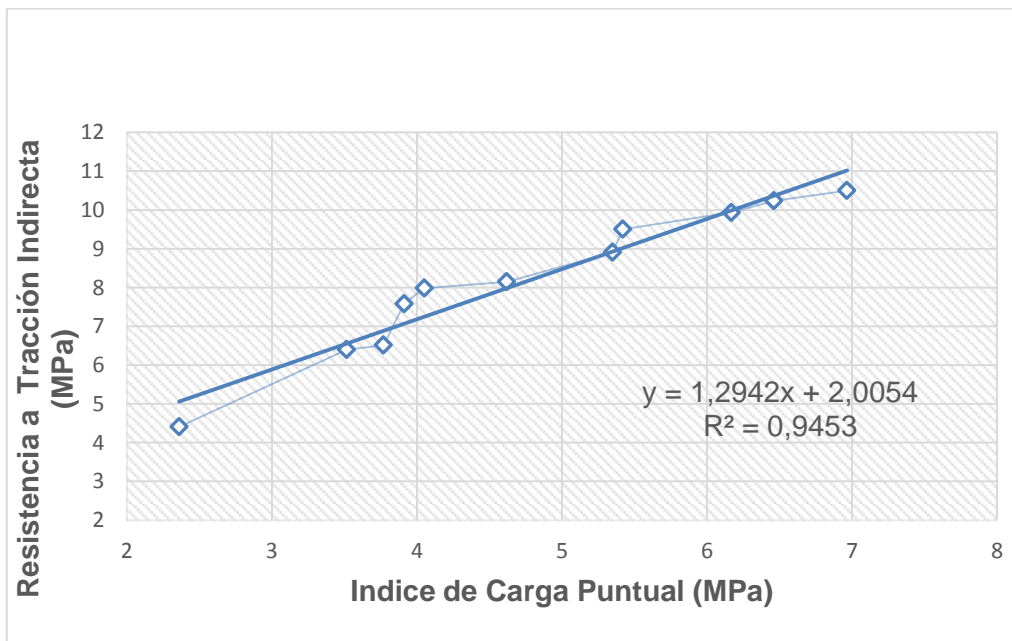


Figura 4.2 Correlación entre Ensayos PLT y BTS

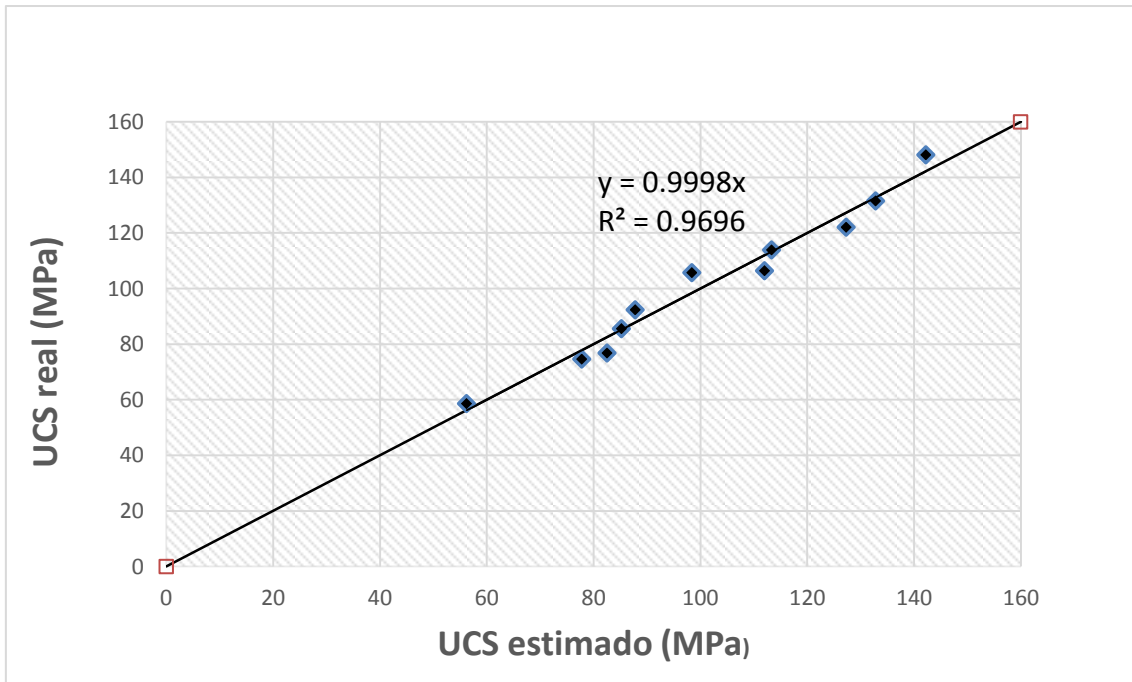


Figura 4.3 Comparación entre los resultados reales de UCS versus los datos estimados

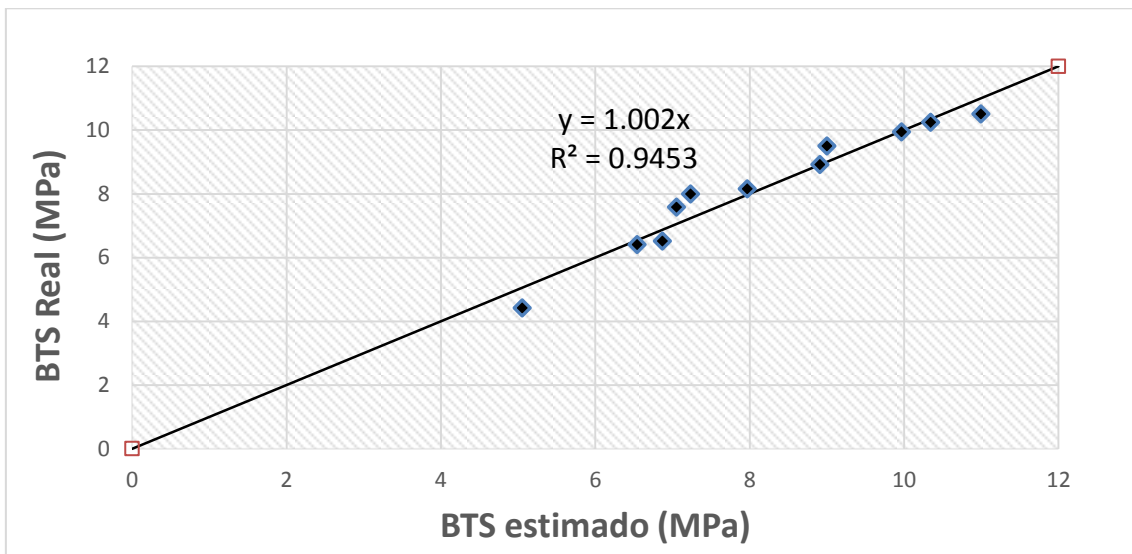


Figura 4.4 Comparación entre los resultados reales de BTS versus los datos estimados

CONCLUSIONES

La relación presente entre UCS, BTS y PLT con más de 60 muestras de litología procedentes al sector una faena minera de la zona central de Chile, entrega resultados con un alto valor de R^2 (0.97) en el primer caso, indica una mayor afinidad entre los resultados de PLT y UCS. Para la relación entre BTS y PLT el coeficiente de correlación llega a (0.93).

Para el caso del análisis de datos entre BTS y UCS con el cálculo de m_i existe un 1,11% de error respecto del valor obtenido en los ensayos triaxiales. Siendo la aproximación presentada válida debido al bajo error porcentual.

Se puede ratificar que para este tipo de roca la relación entre los valores de compresión axial sobre los valores de tracción indirecta entrega un valor casi ajustado al m_i .

Dentro de la validación y análisis de datos los resultados se trabajaron solo los tipos de rupturas aceptadas por las diferentes normas

REFERENCIAS

- [1] American Society for Testing Materials ASTM; Standards D7012-14 Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures; 2014, 9p.
- [2] American Society for Testing Materials; ASTM Standards D3967-08 Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, 2008, 4p.
- [3] American Society for Testing Materials, ASTM Standards D5731-08 Standard method for determination of the point load strength index of rock; 2008; 12p.
- [4] ISRM, International Society of Rock Mechanics; Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 15, 1978, pp.99–103
- [5] ISRM. International Society of Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Suggested Method for Determining Point Load Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 22, 1985, pp.51-60.
- [6] PERRAS, Matthew A; DIEDERICHS, Mark S; A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing; Geotechnical and geological Engineering; April 2014, Volume 32, Issue 2, pp.525-546.
- [7] YAGIZ, Saffet; Comment on “Point Load Test on Meta-Sedimentary Rocks and Correlation to UCS and BTS” by Diyuan Li and Louis Ngai Yuen Wong; Rock Mechanics and Rock Engineering; 2013; p4
- [8] Diyuan Li & Louis Ngai Yuen Wong; Discussion on “Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths of Gypsum Rock by Point Load Testing” by M. Heidari.; Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, p4.
- [9] Diyuan Li & Louis Ngai Yuen Wong; Point Load Test on Meta-Sedimentary Rocks and Correlation to UCS and BTS; Rock Mechanics and Rock Engineering; 2012, p8
- [10] HEIDARI, M; Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths of Gypsum Rock by Point Load Testing; Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, p9
- [11] Bieniawski ZT. The Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol., Sept., 1975, pp. 1-11
- [12] Broch E, Franklin JA.; The Point Load Strength Test.; Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9, 1972, pp. 669-697
- [13] Sari, M; A simple approximation to estimate the Hoek-Brown parameter “ m_i ” for intact rocks; Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering; 2010; 4p.
- [14] Cai, M; Practical estimates of tensile strength and Hoek-Brown strength parameter m_i of brittle rocks; Rock Mech Rock Eng, 2009; 18p