

RELEVÂNCIA DA DIREÇÃO DE ANISOTROPIA DE UM CORPO DE PROVA EM ENSAIOS UNIAXIAIS E SEUS IMPACTOS NOS RESULTADOS OBTIDOS

Túlio P. F. Fonseca ¹; Yan Santos ²; Fábio Soares Magalhães ³

Resumo – A elaboração de projetos e estudos de geologia de engenharia em maciços rochosos requer um entendimento aprofundado das principais características dos materiais que compõem o terreno. A caracterização das rochas pode ser realizada por meio de ensaios laboratoriais, que são fundamentais para identificar os materiais e, assim, estabelecer critérios de projeto. Esse trabalho aborda a relevância da direção da anisotropia nos resultados de ensaios de compressão uniaxial em rocha. O ângulo da foliação em relação à direção de carregamento (ângulo β) é determinante no tipo de ruptura encontrado, bem como nos valores dos resultados desses ensaios. Dessa forma, é imprescindível que essa informação seja considerada nas etapas de seleção e coleta de testemunhos, e também na etapa de tratamento dos ensaios.

Abstract – For engineering geology projects and studies carried out on rock masses, it is necessary to know the main characteristics of the materials that make up the terrain. The characterization of a rock can be done through laboratory tests. These tests are essential, since the recognition of the materials makes it possible to determine the design criteria, dimensioning premises, executive methods and work control. This work addresses the relevance of the direction of anisotropy in lab tests of uniaxial compression tests on rock. The angle of the foliation in relation to the loading direction (angle β) is decisive in the type of rupture found, as well as in the values of the results of these tests. Therefore, it is essential that this information be considered in the stages of selection and collection of specimens, and also in the stage of treatment of the tests.

Palavras-Chave – Ensaio de Compressão Uniaxial em rocha; ensaios de laboratório; anisotropia.

¹ Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)997182485, tulio.fonseca@walmengenharia.com.br

² Geól, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)988073631, yan.santos@walmengenharia.com.br

³ Geól, Dr, Walm BH Engenharia Ltda: Belo Horizonte – MG, (31)994230710, fabio.magalhaes@walmengenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

Os resultados de ensaios de laboratório em rocha são fundamentais para subsidiar estudos e projetos desenvolvidos em maciços rochosos. As condições de um ensaio de laboratório devem ser controladas conforme as necessidades de projeto e, por isso, é fundamental que os responsáveis pelo ensaio tenham conhecimento das condições a serem ensaiadas. Pequenos detalhes podem impactar diretamente nos resultados observados. Esse trabalho tem por objetivo abordar a influência da direção da anisotropia nos resultados de ensaios de compressão uniaxial em rocha. É muito comum, especialmente em projetos no Quadrilátero Ferrífero, materiais marcados por planos de foliação proeminentes/penetrativos e, portanto, é fundamental que os ensaios sejam realizados de maneira criteriosa no que diz respeito ao posicionamento correto da estrutura/anisotropia nos corpos de prova.

2. ANISOTROPIA

Uma rocha é dita anisotrópica quando suas propriedades variam dependendo da direção em que são medidas. Comumente os maciços rochosos apresentam algum grau de anisotropia nos parâmetros de resistência e deformabilidade, devido a influência de características como planos de descontinuidades, orientação mineral, textura, microestruturas, etc. Tendo em vista a variação dos parâmetros de resistência em uma rocha anisotrópica, é preciso que os ensaios de laboratório sejam realizados de maneira criteriosa em relação ao posicionamento dos planos estruturais. Jaeger (1960) mostrou que um plano único de fraqueza orientado de forma otimizada ($45^\circ + \phi/2$) em rochas intactas controlava a resistência da massa rochosa. Nesse mesmo trabalho, observou ainda que a resistência da rocha intacta era recuperada quando a orientação do plano estava em um ângulo grande em relação à carga aplicada. Esse estudo evidenciou que a variação da resistência em uma massa rochosa estava diretamente relacionada à orientação dos planos de anisotropia nas rochas intactas. Hoek and Brown (1980) consideram que o plano único de fraqueza de Jaeger (1960) é suficiente para prever a resistência da rocha, quando ela se comporta de maneira anisotrópica devido à presença de um plano único de fraqueza (Figura 1).

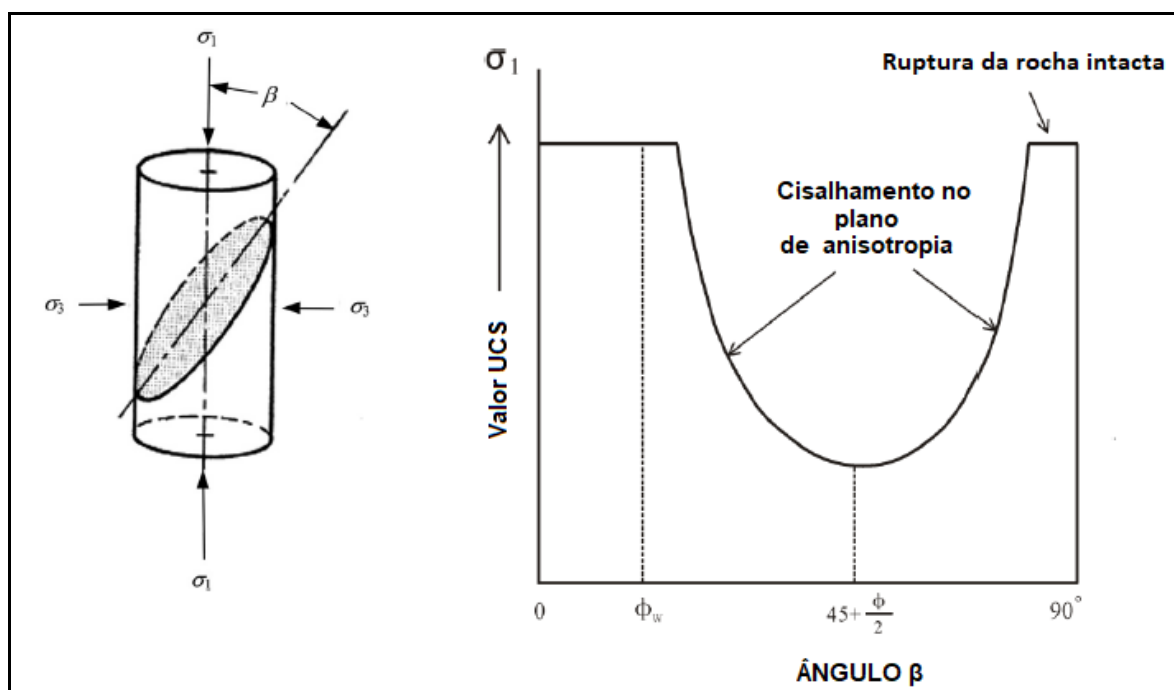


Figura 1. Variação da resistência axial em relação à inclinação da anisotropia β (modificado de Hoek and Brown, 1980).

Roy (1993) e Teja (2008) realizaram testes de laboratório para examinar o efeito da variação da orientação dos planos de fraqueza na resistência à compressão uniaxial em rocha - os ângulos foram variados de 0° a 90°. Lu *et al.* (2013) desenvolveram estudos para simular numericamente os experimentos de laboratório realizados por Roy (1993) e Teja (2008). Os resultados são apresentados na Figura 2 e mostram que o modelo teórico apresentado na Figura 1 é também obtido empiricamente.

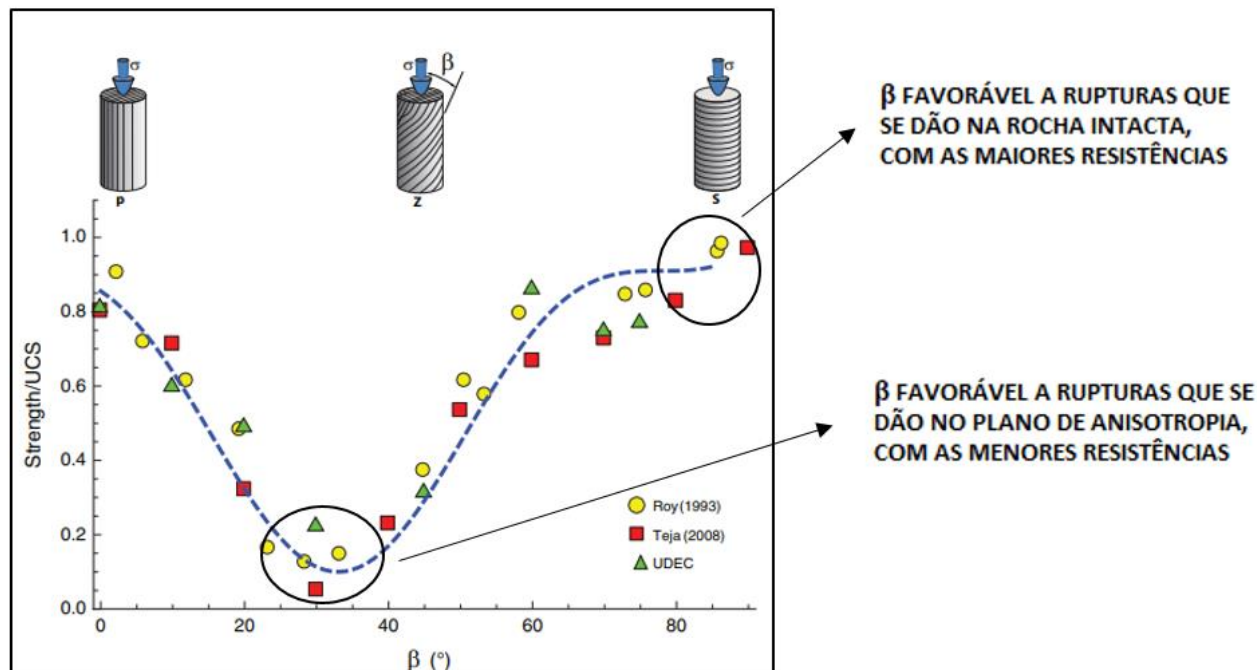


Figura 2. Tendência de variação do Valor UCS extraído de ensaios uniaxiais em função do ângulo β entre a anisotropia e a direção de carregamento. Figura modificada de Lu *et al.* (2013).

3. ESTUDO DE CASO

Os dados apresentados nesse estudo são provenientes de uma mina do Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por materiais com anisotropia proeminente, formada por planos de foliação penetrativos em um contexto geológico de rochas metamórficas como xistos, filitos e gnaisses. Essa mina possui um banco de dados de ensaios laboratoriais em rocha robusto e diversificado. Entretanto, as campanhas de ensaios foram realizadas sem grande controle da direção de anisotropia durante a etapa de coleta dos corpos de prova, de modo que as amostras apresentavam ângulos variados entre a anisotropia e a direção de carregamento.

3.1. Ângulo β

Para o tratamento adequado das amostras ensaiadas, uma etapa primordial do trabalho foi o cálculo do ângulo β entre a anisotropia e a direção de carregamento do ensaio, para cada corpo de prova avaliado. Essa etapa do trabalho foi feita a partir das fotografias disponibilizadas, utilizando o *software Autocad*, da empresa Autodesk.

3.2. Tipos de Ruptura Observados

Cada corpo de prova ensaiado foi classificado quanto ao tipo de ruptura obtida no ensaio – essa classificação foi feita a partir de análise fotográfica. Os diferentes tipos observados são apresentados abaixo.

3.2.1. Cisalhamento Estrutural

Rupturas que se dão nos planos de anisotropia (Figura 3) e que, portanto, tendem a apresentar os menores valores de resistência. Como observado no item anterior, tendem a ocorrer com ângulo β em torno de 30° a 45° em relação à direção de carregamento.



Figura 3. Exemplo de ruptura por Cisalhamento Estrutural, paralela ao plano de anisotropia.

3.2.2. Cisalhamento – Rocha Intacta

Rupturas que se dão na rocha intacta (Figura 4) e que, portanto, tendem a apresentar os maiores valores de resistência. Como observado acima, tendem a ocorrer com ângulo β em torno de 90° em relação à direção de carregamento.



Figura 4. Exemplo de ruptura por Cisalhamento – Rocha Intacta.

3.2.3. Cisalhamento – Estrutural/Rocha Intacta

Rupturas que consistem em uma combinação entre o Cisalhamento Estrutural e o Cisalhamento – Rocha Intacta. Parte do plano rompido se dá paralelo à anisotropia, e outra parte se propaga na rocha intacta (Figura 5).



Figura 5. Exemplo de ruptura mista: Cisalhamento – Estrutural/Rocha Intacta.

3.2.4. Clivagem Axial

As rupturas do tipo Clivagem Axial apresentam os planos de fratura aproximadamente paralelos à direção de carregamento, ou seja, verticalizados (Figura 6).



Figura 6. Exemplo de ruptura por Clivagem Axial.

3.2.5. Kink Band

As rupturas do *Kink Band* apresentam geometria bastante específica, como a da Figura 7.



Figura 7. Exemplo de ruptura do tipo *Kink Band*.

3.2.6. Clivagem Axial/Kink Band

No trabalho realizado observou-se ser muito comum a associação entre os tipos de ruptura Clivagem Axial e *Kink Band*, originando geometrias como a da Figura 8.



Figura 8. Exemplo de associação entre os tipos de ruptura Clivagem Axial e *Kink Band*.

3.2.7. Catáclase

As rupturas tipo Catáclase apresentam geometria totalmente aleatória, cataclástica (Figura 9).



Figura 9. Exemplo de ruptura do tipo Catáclase.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse item correspondem aos ensaios realizados em litotipo denominado Xisto Compacto (XTC), que consiste em um material com variações composicionais: sericita-xistos, quartzo xistos e clorita-xistos.

4.1. Relação entre os resultados obtidos e os tipos de ruptura

Os resultados dos ensaios por compressão uniaxial mostram que os diferentes tipos de ruptura de modo geral apresentam valores de resistência à compressão uniaxial (UCS) distintos entre si. A Tabela 1 apresenta uma análise estatística dos resultados, enquanto a Figura 9 consiste em um gráfico de frequência acumulada que permite comparar visualmente esses valores. Observa-se que, como esperado, os menores valores de média e mediana são observados nos ensaios com ruptura por Cisalhamento Estrutural, que se dão no plano da anisotropia (mediana de 21,72 MPa). As rupturas por Cisalhamento – Rocha Intacta apresentam mediana de 57,50 MPa, e as rupturas por catáclase consistem em valores espúrios, muito elevados (mediana de 204,10 MPa).

Tabela 1. Estatísticas dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial para o litotipo XTC, conforme os diferentes tipos de ruptura observados.

Tipo de Ruptura	N° Pontos	Min. (MPa)	Max. (MPa)	Moda (MPa)	Média (MPa)	Mediana (MPa)	Std Dev (MPa)	Coef. Variação
Cis. Estrutural	15	2,95	41,03	12,67	20,87	21,72	11,32	0,54
Cis. Estrut./R.I.	18	11,25	55,26	30,29	32,71	30,94	13,51	0,41
Clivagem Axial	9	29,73	76,06	30,10	50,61	44,42	16,56	0,33
<i>Kink Band</i>	2	42,95	69,23	42,91	56,09	56,09	18,58	0,33
Cis. Rocha Intacta	30	12,16	180,04	37,08	52,11	57,50	29,96	0,53
Cliv. Axial/ <i>Kink B.</i>	7	45,45	75,16	45,63	64,84	66,25	10,24	0,16
Catáclase	16	71,97	333,80	164,37	207,51	204,10	64,13	0,31

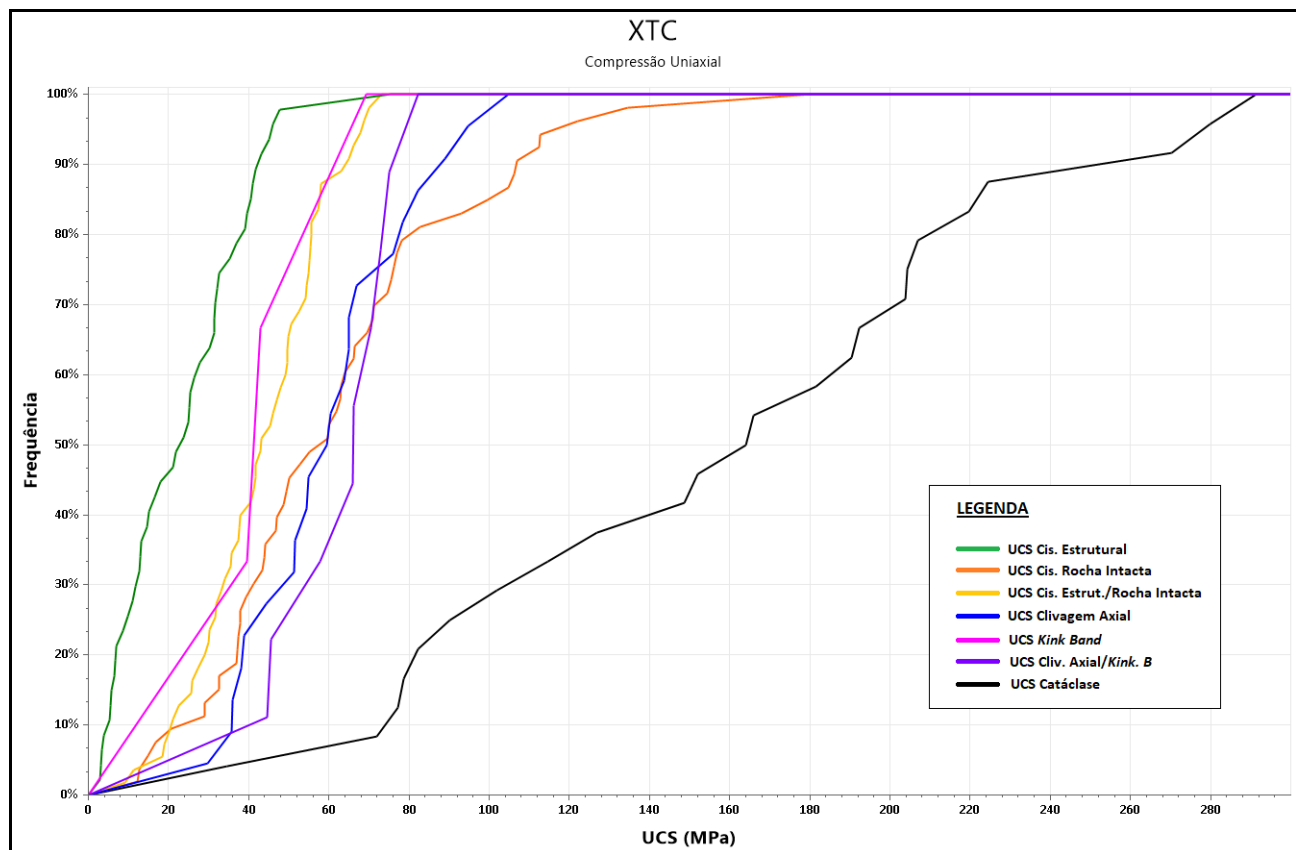


Figura 9. Gráfico de frequência acumulada mostrando os resultados dos ensaios de compressão uniaxial para o litotipo XTC, conforme os diferentes tipos de ruptura observados.

4.2. Relação entre os resultados obtidos e Ângulo β

A Figura 10 apresenta um gráfico de dispersão relacionando os resultados dos ensaios uniaxiais (Valor UCS) em função do ângulo β (ângulo entre a anisotropia e a direção de carregamento). Apesar da alta dispersão encontrada nos gráficos, possivelmente causada devido à elevada heterogeneidade dos xistos, conclui-se que a tendência de distribuição do valor UCS apresentada por Lu *et al.* (2013) se confirma no caso do XTC. Os maiores valores são observados com β igual a 0° e 90° , enquanto que os menores valores se dão próximos de $\beta=30^\circ$ - 45° .

Além disso, nota-se também que a variação no ângulo β está diretamente relacionada ao tipo de geometria de ruptura encontrada ao final dos ensaios. Existe uma concentração de pontos azuis e roxos na região de $\beta=0^\circ$, que representam rupturas do tipo “Kink Band” e “Clivagem Axial”. As rupturas que se dão no plano de anisotropia, identificadas no trabalho como “Cisalhamento Estrutural”, são simbolizadas com a cor verde e estão concentradas em torno de $\beta=30^\circ$ - 45° . As rupturas “Cisalhamento – Rocha Intacta” são apresentadas na cor laranja e concentram-se na região com $\beta=90^\circ$. Os pontos vermelhos, rupturas do tipo “Catáclase”, consistem em rupturas com geometria cataclástica e, de modo geral, não se apresentam concentrados em alguma região em função do ângulo β , mas caracterizam-se por resultados muito elevados, por vezes representando uma dispersão em relação aos demais valores do gráfico.

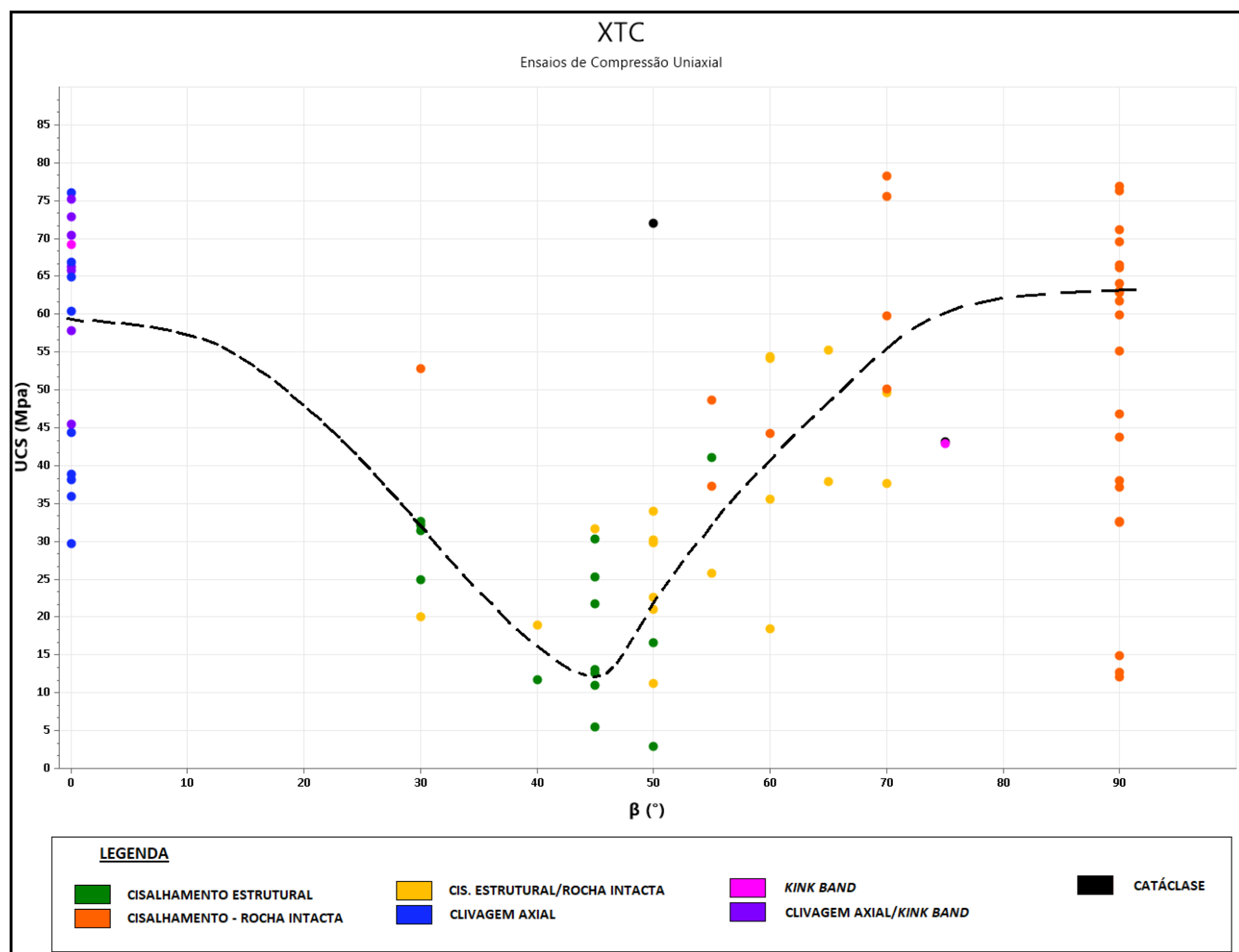


Figura 10. Gráfico de dispersão dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial (UCS) no XTC em função do ângulo β . Em pontilhado, linha de tendência observada.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo abordou a relevância da direção da anisotropia na determinação dos valores de resistência de um material compacto. Conforme apresentado nos itens anteriores, o ângulo da foliação em relação à direção de carregamento de um ensaio de compressão uniaxial (ângulo β) é determinante no tipo de ruptura encontrado, bem como nos valores dos resultados desses ensaios. Dessa forma, é imprescindível que essa informação seja considerada nas etapas de seleção e coleta de testemunhos, e também na etapa de tratamento dos ensaios.

A coleta de corpos de prova em materiais compactos pode ser realizada por meio de talhamento de blocos ou simplesmente pela seleção de testemunhos de sondagem (sendo essa a maneira mais comum). Sendo assim, durante a etapa de coleta, é preciso ter em mente qual o objetivo da campanha, e nesse sentido, escolher as melhores amostras em relação ao ângulo β . É muito comum que em um furo de sondagem a orientação dos planos estruturais em relação ao eixo do furo sofra grandes variações, portanto a definição dos corpos de prova deve levar em conta o ângulo β especificado/desejado na campanha. Da mesma forma, durante o tratamento dos ensaios, esse deve ser um ponto de atenção, visto que não há sentido técnico em agrupar amostras de $\beta=90^\circ$ com amostras de $\beta=40^\circ$, já que espera-se que os valores dos resultados desses ensaios sejam distintos entre si, pois não representam a mesma grandeza física.

REFERÊNCIAS

- JAEGER, J.C. 1960. Shear failure of anisotropic rocks. Geol. Magazine.97: 65-72.
- HOEK E. Fracture of anisotropic rock. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 1964;64:501e18.
- HOEK E, BROWN ET. Underground excavations in rock. Boca Raton, FL: CRC Press; 1980. p. 157e65.
- LU, YUN; MARTIN, C. DEREK; LAN, HENGXING. Strength of intact rock containing flaws. In: 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. OnePetro, 2013.
- ROY N. 1993. Engineering behavior of rock mass through study of jointed models. Ph.d thesis. Indian Institute of Technology, Delhi.
- TEJA, P. 2008. An Experimental Study on Strength Behaviour of Jointed Rock Mass Through Modelling Under Uniaxial Compression. BSc Thesis, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.