CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DOS MACIÇOS ROCHOSOS NA CIDADE DE CRATEÚS-CE.

Sebastião Rodrigo Cortez de Souza¹

Paulo Gildânio Ferreira Teixeira^{1,2}

Fábio José Bezerra de Sousa^{1,2}

10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v29n2p95-107

¹Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus Crateús, BR-226, Km 03, Bairro Venâncios, Crateús-CE, Brasil. E-mail: rodrigo@crateus.ufc.br.

²Graduação em Engenharia de Minas – UFC, Crateús-CE.

RESUMO

O conhecimento dos maciços rochosos e terrosos em que serão implantadas obras de engenharia civil é fundamental para a elaboração de projetos coerentes dos pontos de vista técnico e econômico. Identificar a distribuição espacial dos materiais no subsolo, caracterizá-los quanto às suas propriedades e determinar o estado de tensões permite projetar obras civis mais seguras, que otimizem recursos e que gerem menos impactos ambientais. Contudo, principalmente em cidades interioranas do Estado do Ceará, um estudo tecnicamente adequado nem sempre é realizado de forma adequada e profissional. Visando amenizar essa deficiência no município de Crateús-CE, um trabalho de caracterização geomecânica foi realizado com o objetivo de mapear e classificar o contraste de estabilidade na zona urbana do município Crateús-CE. Para tal, foi utilizado o índice de qualidade de maciço (Q), detalhado nos estudos de Barton (1974). O índice Q é calculado a partir de 6 parâmetros, que são definidos através das características obtidas em diversos afloramentos rochosos distribuídos ao longo da cidade. De posse destas informações pontuais, estes dados foram inseridos em um ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) com a finalidade de se obter a interpolação das informações e assim apresentar o produto final na forma de mapas temáticos, de grande utilidade para as empresas de construção que planejem construir obras civis na zona urbana de Crateús.

Palavras chave – Classificação Geomecânica. Estabilidade. Maciços Rochosos. Índice Q.

ABSTRACT

The knowledge of the rocky massifs and soils in which civil engineering works will be implemented is fundamental for the elaboration of coherent projects from the technical and economic points of view. Identifying the spatial distribution of materials in the subsurface, characterizing them as to their properties and determining the state of tensions allows us to design safer civil works that optimize resources and generate less environmental impacts. However, especially in inner cities, a proper study is not carried out. Aiming to solve this deficiency in the Crateús city, Ceará state, a work of geomechanical characterization was carried out with the objective of mapping and classifying the stability contrast in the urban area of the municipality of Crateús-CE. For this, we used the mass quality index (Q), detailed in Barton's studies (1974). The Q index is calculated from 6 parameters that are defined by the characteristics obtained in several rocky outcrops distributed throughout the city. With this specific information,

these data were inserted in a GIS (Geographic Information Systems) environment in order to obtain the interpolation of the information and thus present the final product in the form of forecast maps, which will be very useful for companies to build civil works in the urban area of Crateús.

Keywords - Geomechanical Classification. Stability. Rocky Massifs. Q Index.

INTRODUÇÃO

Antes da realização de qualquer obra de construção civil é de fundamental importância determinar o comportamento geomecânico das rochas e/ou solos da área de trabalho, visando a adoção do método construtivo com a melhor relação custo-benefício (Price, 2009).

A maioria dos sistemas de classificação geomecânica foi desenvolvida a partir de estudos de casos da engenharia civil (Wickham *et al.*, 1972; Bieniawski, 1973; Barton *et al.*, 1974; Bieniawski, 1989). Os sistemas de classificação utilizados para caracterizar os maciços rochosos possuem um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados *in situ* e/ou em amostras de sondagens. A finalidade destas classificações é sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos em classes, associando a essas classes um padrão de comportamento.

Os parâmetros sobre a qualidade dos maciços rochosos podem ser obtidos através de diversos sistemas de classificação geomecânica disponíveis na literatura. Neste trabalho utilizou-se a técnica do “Q de Barton”, técnica amostral simples a qual tende a classificar o tipo de maciço de interesse, baseando principalmente na quantidade e disposição de fraturas no plano de falhas os quais são encontradas em afloramentos rochosos em uma área coincidente com a zona urbana do município de Crateús.

Muitos autores utilizaram técnicas geoestatísticas similares para

estimar parâmetros geomecânicos que determinam a qualidade do maciço rochoso, como por exemplo You & Lee (2006), Choi & Lee (2007), Choi *et al.* (2009), Stavropoulou *et al.* (2007), Exadaktylos & Stavropoulou (2008), Kaewkongkaew *et al.* (2011), Oh *et al.* (2004) e Egaña & Ortiz (2013). O uso dessas técnicas tem aumentado no ramo da mecânica de rochas, pois estimar dados necessários em locais de difícil acesso é o que viabiliza o desenvolvimento de obras.

Esses dados são muito relevantes no que tange ao planejamento urbano, servindo como arcabouço para a elaboração de planos diretores, cartas geotécnicas e projetos de engenharia futuros para a cidade de Crateús. Neste sentido, com o intuito de estabelecer uma maior compreensão sobre classificação e comportamento geotécnico de maciços rochosos na área urbana da cidade.

O município de Crateús está localizado na porção oeste do estado do Ceará (Fig. 1). O município vem apresentando um considerável desenvolvimento urbano na última década, sobretudo devido à instalação de um polo educacional, tanto em nível tecnológico como superior, o que vem acarretando um acelerado crescimento da construção civil. Por este motivo, este trabalho visa caracterizar e mapear o comportamento geomecânico das rochas expostas (afloramentos) na zona urbana da cidade de Crateús, com vias de nortear futuras construções civis e o melhor uso do solo na área de abrangência do estudo.

Figura 1. Localização do município de Crateús-CE e da área de estudo deste trabalho.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

O contexto geológico regional é referente ao Domínio Ceará Central, porção norte da Província Borborema, e é bem descrito nos trabalhos de mapeamento geológico regional sistemático da CPRM (Costa, 2017), visualizados na figura 2.

O Domínio Ceará Central é representado por um embasamento arqueano/paleoproterozóico, supracrustais meso/neoproterozóica e intensa granitogênese neoproterozóica associada ao evento Pan-Africano/Brasiliano, responsável pela colagem ocidental do super-continente Gondwana. A unidade mais antiga, provavelmente paleoproterozóica (?), refere-se ao Complexo Canindé do Ceará, mapeado como uma sequência predominantemente paraderivada, com-posta por

biotita-gnaisses, migmatitos, lentes de rochas metabásicas e matacalcários.

Grande parte da área mapeada, cerca de 40 %, é representada por um domínio granito-migmatítico neoproterozóico denominado de Complexo Tamboril-Santa Quitéria, sendo dividido em: (1) Diatexitos representados principalmente por uma fase anatética rosa, de natureza cálcio-alcalina de alto-K, levemente peraluminosa, derivada da fusão parcial de rochas dioríticas/tonalíticas de crosta média/inferior; (2) Granitóides, que constituem intrusões sin- a tardi-anatéticas, apresentam feições de mistura de magmas, e são representados por monzonitos, sienitos e quartzo-monzonitos, com assinatura shoshonítica e raramente ultrapotássica. Para este magmatismo híbrido é sugerida a participação de uma fonte mantélica previamente enriquecida por metassomatismo.

Figura 2. Mapa geológico do município de Crateús-CE, segundo dados disponibilizados pela CPRM (modificado de Costa, 2017).

As rochas aflorantes na região de estudo são em sua maioria rochas metamórficas ortoderivadas, compostas principalmente por minerais félsicos (quartzo e feldspato potássico) e subordinadamente por minerais máficos (biotita e anfibólio), as vezes recortadas por diques e stocks de rochas graníticas ácidas (Fig. 3). Localmente são encontrados milonitos produzidos em zonas de falhas como produtos de efeitos tectônicos. Essas zonas de falhas são caracterizadas por um intenso faturamento, de caráter tectônico, quase sempre hospedando drenagens devido às facilidades

erosivas e por este motivo quase sempre se localizando em regiões mais baixas topograficamente. Em geral, os solos são pouco expressivos, do tipo transportados e normalmente não ultrapassam 30 cm de profundidade.

A figura 3 também mostra a localização dos 14 pontos amostrados para a caracterização geomecânica deste trabalho. A partir do mapa geológico de Costa (2017), foram incrementadas algumas melhorias ao resultado do mapeamento geológico na área urbana do município de Crateús (Fig. 3).

Figura 3. Mapa geológico do entorno da área urbana da cidade de Crateús-CE (modificado de Costa, 2017).

Para complementar as informações geológicas obtidas a partir do mapeamento sistemático da CPRM e do trabalho de campo, um estudo de extração dos principais lineamentos estruturais foi executado na mesma área. Este estudo foi realizado usando como base imagens do sensor remoto GeoEye®, disponibilizadas pelo aplicativo Google Earth® e através de imagens de radar SRTM® e Jers®.

No total foram extraídos 44 lineamentos estruturais, que após serem agrupados, foram classificados em 4 famílias: Lineamentos E-W (Fig. 4a), Lineamentos NE-SW (Fig. 4b), Lineamentos NW-SE (Fig. 4c) e

Lineamentos N-S (Fig. 4d). Em termos de representação espacial, os lineamentos NE-SW são os mais abrangentes, perfazendo aproximadamente 52% dos lineamentos estudados. São seguidos pelos lineamentos E-W (cerca de 20,5%), pelos lineamentos NW-SE (cerca de 18,2%) e pelos lineamentos N-W (cerca de 9,3%). A figura 4 sintetiza as informações dispostas acima.

Desta forma, é provável correlacionar a direção NE-SW com as principais estruturas encontradas na área, sobretudo desenvolvendo famílias de fraturas rúpteis e zonas de fraquezas no terreno.

Figura 4. Distribuição dos lineamentos estruturais interpretados a partir de sensores remotos observados na área de estudo.

Foram analisados catorze (14) afloramentos rochosos distribuídos ao longo da zona urbana da cidade de Crateús (Tabela 1 e Fig. 3). Embora a quantidade de afloramentos seja relativamente pequena, têm-se que considerar o fato do estudo ser realizado em zona urbana, onde

praticamente inexitem exposições rochosas, sobretudo, devido ao forte antropismo causado pela construção civil. Em cada afloramento foram coletadas informações litológicas e estruturais, bem como estimados os parâmetros para o cálculo do índice Q de Barton.

Tabela 1. Coordenadas e descrição litológica dos pontos coletados neste trabalho.

PONTO	LONGITUDE	LATITUDE	LITOLOGIA
1	316001	9427349	Ortognaisse
2	316131	9428942	Ortognaisse
3	314860	9425718	Ortognaisse
4	315472	9426278	Ortognaisse
5	315513	9426713	Ortognaisse
6	314142	9428682	Milonito
7	318044	9426061	Ortognaisse
8	313712	9427302	Ortognaisse
9	313538	9426046	Milonito
10	314337	9427931	Ortognaisse
11	315000	9427371	Milonito
12	314921	9428244	Ortognaisse
13	315817	9428730	Ortognaisse
14	316856	9426674	Ortognaisse

MATERIAL E MÉTODO

O índice Q (Barton *et al.*, 1974) é definido através de 6 parâmetros calculados utilizando-se a macro Excel® (Fig. 5), e classificados conforme a Tabela 2:

- **RQD** é o índice de qualidade da rocha e indica a porcentagem de rocha recuperada em intervalos de rocha intactos iguais ou maiores que 10 cm em um afloramento de 2 m de comprimento.
- **J_n** é caracterizado pelo resultado do mapeamento e agrupamento de famílias de fraturas.

- **J_r** é o determinante das condições de rugosidade ou textura das superfícies principais, definindo sua escala, menor ou maior.
- **J_a** descreve as condições de alteração e fricção das fraturas.
- **J_w** é o fator de redução da água e mede o efeito da fraqueza de alterações sob estas condições.
- **SRF**, ou Fator de Redução de Estresse (*Stress Reduction Factor*), que dimensiona o fraturamento da rocha devido ao excesso de estresse.

Figura 5. Composição e parâmetros utilizados para a composição do índice Q de Barton.

Tabela 2. Classificação do maciço rochoso segundo os valores de Q de Barton.

Valor do Índice de Barton	Classificação do Maciço
0,001 – 0,01	Excepcionalmente Pobre
0,01 – 0,1	Extremamente Pobre
0,1 – 1	Muito Pobre
1 – 4	Pobre
4 – 10	Regular
10 – 40	Bom
40 – 100	Muito Bom
100 – 400	Extremamente Bom
400 – 1000	Excepcionalmente Bom

Em cada afloramento, foram coletadas informações estruturais, tais como direção, espessura e classificação das famílias de fraturas existentes, bem como a litologia associada.

Por fim, após a determinação do valor de Q de Barton para cada afloramento, foi criado um mapa de interpolação estatística com a ajuda do software MapInfo Professional 12[®] (módulo Encom Discover 15[®]) abrangendo toda a área de estudo, usando método do inverso do quadrado da distância, com os seguintes parâmetros:

- Inverse Distance Weighting
- 49 columns, 25 rows
- Cell size: 0,002

- Search distance: 0,02
- Nearest neighbors: min. 1 and max 9.

RESULTADOS

Os resultados de Q de Barton foram calculados para catorze (14) afloramentos estudados na cidade de Crateús e podem ser vistos na Tabela 3. A propósito de a malha amostral apresentar irregularidades na sua configuração, é válido salientar que o estudo foi realizado na zona urbana do município, e assim sendo, na maioria das vezes inexistem afloramentos que possam ser estudados para efeitos deste trabalho.

Tabela 3. Parâmetros amostrados e valores obtidos para os pontos coletados neste trabalho.

PONTO	PARÂMETROS OBTIDOS EM CAMPO						PARÂMETROS CALCULADOS			
	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	RQD/Jn	Jr/Ja	Jw/SRF	Q BARTON
1	96,35	3,00	4,00	1,00	1,00	0,50	32,12	4,00	2,00	256,93
2	92,73	3,00	4,00	1,00	1,00	0,50	30,91	4,00	2,00	247,28
3	94,85	3,00	3,00	1,00	1,00	0,40	31,62	3,00	2,50	237,13
4	86,65	6,00	3,00	1,00	1,00	0,50	14,44	3,00	2,00	86,65
5	97,50	3,00	3,00	1,00	1,00	0,40	32,50	3,00	2,50	243,75
6	80,75	6,00	3,00	1,00	1,00	0,50	13,46	3,00	2,00	80,75
7	96,25	3,00	3,00	1,00	1,00	0,50	32,08	3,00	2,00	192,49
8	93,45	3,00	4,00	1,00	1,00	0,50	31,15	4,00	2,00	249,20
9	86,91	6,00	3,00	1,00	1,00	0,50	14,49	3,00	2,00	86,91
10	94,00	3,00	3,00	1,00	1,00	0,40	31,33	3,00	2,50	235,00
11	88,35	6,00	3,00	1,00	1,00	0,50	14,73	3,00	2,00	88,35
12	98,10	3,00	4,00	1,00	1,00	0,50	32,70	4,00	2,00	261,60
13	95,30	3,00	3,00	1,00	1,00	0,50	31,77	3,00	2,00	190,60
14	96,05	3,00	4,00	1,00	1,00	0,50	32,02	4,00	2,00	256,13

Segundo Barton *et.al.* (1974), os valores de Q variam de 0,001 (excepcionalmente pobres) a 1000 (excepcionalmente bons) (Tabela 2). Dentre os valores obtidos neste trabalho, dez (10) pontos (1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 13 e 14) estão inseridos entre a categoria de valores de 100 a 400, o que permite classificá-los como sendo valores extremamente bons para o índice Q . Entretanto, quatro (04) pontos (4, 6, 9 e 11) estão localizados na categoria de valores entre 40 a 100 (valores muito bons).

Em cada ponto de afloramento estudado, as informações estruturais e litológicas foram complementadas com fotografias e um croqui esquemático, onde são destacadas as falhas/fraturas observadas em campo, em escala adequada. Como exemplificação do exposto acima, a figura 6 mostra o ponto do afloramento 12 ($RQD=98,10$ e $Q=261,60$). Na figura 6a tem-se a fotografia representativa do afloramento, e na figura 6b tem-se o croqui do mesmo, com destaque para as intercessões das fraturas ao longo do intervalo amostrado no estudo.

Figura 6. A) Fotografia representativa do afloramento 12. B) Croqui de A, com destaque para as intercessões das fraturas ao longo do intervalo amostrado no estudo (em vermelho). Afloramento em piso.

Avaliando-se a resposta reológica das zonas rúpteis de cada afloramento, na forma de diagramas de rosetas individuais, pode-se notar que existe uma heterogeneidade na variação de resultados ao longo dos 14 pontos estudados em campo. A figura 7 mostra os resultados obtidos, para cada ponto. Apesar dos resultados pouco

homogêneos, pode-se destacar que em geral o grupo de famílias de fraturas que mais se destacam são as de direção NE-SW, seguidos pelas famílias de fraturas E-W, corroborando o resultado obtido a partir do estudo de lineamentos interpretados sob sensores remotos, demonstrando a validade desta técnica.

Figura 7. Direção preferencial das famílias de fraturas observadas em cada um dos pontos de estudo.

DISCUSSÃO

O processamento geostatístico para estimar os parâmetros geomecânicos de Q de Barton para a área urbana do município de Crateús-CE resultou no

mapa exposto na figura 8. Este mapa determina a qualidade do maciço e fornece uma boa indicação para a capacidade de resistência mecânica do substrato rochoso ante a execução de projetos de construção

civil, com a finalidade de indicar a previsionabilidade da distribuição dos valores de Q ao longo da zona urbana do município de Crateús.

É possível notar que de uma forma geral os valores de Q de Barton são consideravelmente altos na zona urbana da cidade de Crateús-CE, indicando pouco faturamento e uma constituição geológica favorável à resistência do maciço rochoso (Fig. 8). Entretanto, alguns pontos com valores de Q abaixo de 100 foram reportados (pontos 4, 6, 9 e 11), quase sempre associados a zonas de falhas, em corredores de cisalhamento, onde afloram rochas milonitizadas com forte presença de água percolando microfraturas. Dentre essas áreas, destaca-se a área

compreendida pelo ponto 11 ($Q=88,35$), que se localiza no centro da cidade, em uma área com forte estímulo à verticalização futura. As regiões dos pontos 4 ($Q=86,65$), 6 ($Q=80,75$) e 9 ($Q=86,91$), apesar dos valores Q baixos, despertam menos atenção à riscos construtivos e/ou de resistência estrutural devido a estarem localizadas em zonas periféricas, com baixa taxa de urbanização e pouca atratividade para grandes projetos futuros de construção civil pesada.

Conforme já mencionado anteriormente, o mapeamento apresenta algumas heterogeneidades amostrais que certamente afetariam a interpolação geoestatística realizada.

Figura 8. Mapa de interpolação geoestatística dos valores de Q de Barton obtidos neste trabalho.

Entretanto, cabe ressaltar que uma amostragem regular não foi possível devido à falta de afloramentos na zona urbana da cidade de Crateús.

CONCLUSÕES

Um trabalho de levantamento de informações geológicas, estruturais e geomecânicas foi realizado ao longo de

catorze afloramentos que representam a região de zona urbana do município de Crateús-CE. As principais rochas que afloram no município são metamórficas ortoderivadas, em geral fracamente fraturadas, compostas predominantemente por minerais félsicos resistentes à maioria das condições mecânicas. O índice Q de Barton foi calculado para cada um dos catorze afloramentos, e seus valores foram interpolados estatisticamente para ser possível gerar um mapa de previsão para valores ao longo da zona urbana do município. Este estudo comprovou que os valores de Q obtidos são consistentemente altos, classificados como muito bom (80,75 a 88,35) a extremamente bom (192,49 a 256,93), o que comprova que a região está situada sobre um embasamento geológico que funciona como um substrato de alta favorabilidade para a execução de obras civis de uma forma em geral, caracterizado por uma excelente resistência mecânica e muito boas caracterizações geomecânicas.

REFERÊNCIAS

- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. V.6, n.4, p. 189-236.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*, New York: John Wiley & Sons. 251 p.
- Bieniawski, Z. T. 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses, *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15, pp. 335-344.
- Choi, J. Y., Lee, C. I. 2007. An estimation of rock mass rating using 3D-indicator kriging approach with uncertainty assessment of rock mass classification. *Proceeding of the 11th congress of the International Society for Rock Mechanics*. Lisbon, 2, pp. 285-288.
- Choi, Y., Yoon, S.Y., Park, H.D. 2009. Tunnelling Analyst: A 3D GIS extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunnelling. *Computers & Geosciences*, 35, pp. 1322-1333.
- Costa, F. G. (Org). 2017. *Geologia e recursos minerais da folha Crateús – SB.24-V-C-III: estados do Ceará e Piauí. Escala 1:100.000*. Fortaleza: CPRM. 117p.
- Egaña, M., Ortiz, J.M. 2013. Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. *Journal of GeoEngineering*, 8 (3), pp. 83-90.
- Exadaktylos, G., Stravopoulou, M., Xiroudakis, G., De Broissia, M., Schwarz, H. 2008. A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41, pp. 797-834.
- Kaewkongkaew, K., Phien, N., Harnpattanapanich, T., Sutiwanich, C. 2011. Geological Model of Mae Tang-Mae Ngad Diversion Tunnel Project, Northern Thailand. *Open Journal of Geology*, 3 (5), pp. 340-351.
- Oh, S., Chung, H., Lee, D. K. 2004. Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation. *Environmental Geology*, 46, pp. 1070-1078.
- Price, D. G. 2009. *Engineering Geology: Principles and Practice*. Springer-Verlag. Berlin. 460p.
- Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., Saratsis, G. 2007. A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavations in Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40 (3), pp. 213-243.

- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., Skiner, E.H. 1972. Support determination based on geologic predictions. Proc. North American rapid excav. tunneling conf, pp. 43-64.
- You, K., Lee, J.S. 2006. Estimation of Rock Mass Classes using the 3 Dimensional Multiple Indicator Kriging Technique. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 21 (3/4), pp. 229-234.