

Análise ROC para a Avaliação do Desempenho dos Critérios Empíricos que Predizem o Potencial de *Rockburst*

Jader Alfonso Ruiz Perez

Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF, Brasil, jarp6588@gmail.com

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: O *rockburst* é uma instabilidade dinâmica que ocorre nas escavações subterrâneas que estão submetidas a altas tensões geostáticas, causando uma liberação violenta de energia de deformação armazenada no maciço rochoso. O potencial de *rockburst* de uma escavação pode ser estimado pelos diferentes critérios empíricos existentes na literatura, os quais são baseados nas tensões relativas existentes no maciço rochoso ou por meio da energia armazenada na rocha e suas mudanças devido aos processos de escavação. O desempenho destes critérios que predizem o potencial de *rockburst*, foi avaliado com a metodologia de análise Característica Operativa do Receptor, a qual por meio de uma matriz de confusão permite comparar os resultados preditos pelos critérios com os obtidos na realidade, para isto se contou com um banco de dados de *rockburst* que ocorreram em diferentes projetos ao redor do mundo.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial de *Rockburst*, Análise ROC, Avaliação de Desempenho.

1 INTRODUÇÃO

O *rockburst* é um fenômeno presente nas obras subterrâneas há muito tempo, mas os primeiros registros se têm desde o Sec. XX. (Blake & Hedley, 2009). Segundo Hoek (2000), são falhas explosivas de rocha que ocorrem quando altas concentrações de tensões são induzidas ao redor de escavações subterrâneas. Segundo Dong *et al.* (2013), o *rockburst* é uma instabilidade dinâmica que ocorre escavações subterrâneas que estão submetidas a altas tensões geostáticas, causando uma liberação violenta de energia de deformação armazenada no maciço rochoso.

A avaliação do potencial de *rockburst* nas escavações é uma parte muito importante na hora estudar, controlar e mitigar esta instabilidade dinâmica, que pode ser estimado baseados nas tensões relativas existentes no maciço rochoso e as propriedades mecânicas da rocha. Também pode ser avaliado por meio de uma análise energética, a qual é feita considerando a energia armazenada no maciço rochoso e suas mudanças devido aos processos de escavação e operação.

Na literatura existem diferentes critérios

empíricos que tentam fazer esta avaliação, levando em consideração diferentes hipóteses e princípios. Nesta pesquisa foi avaliado o desempenho destes critérios, utilizando a metodologia de análise ROC - Característica Operativa do Receptor (*Receiver Operating Characteristic*), a qual permite comparar o ocorrido na realidade com os resultados obtidos pelos critérios. Para isto, se contou com um banco de dados de 141 eventos de *rockburst* que ocorreram em diferentes locais do mundo e que estão disponíveis na literatura.

2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE *ROCKBURST*

2.1 Critério de Fragilidade a Rocha - Critério Qiao & Tian

Qiao & Tian (1998) utilizaram a definição de fragilidade da rocha, dada por um índice de relação entre a resistência à compressão uniaxial e a resistência à tração da rocha. Estes autores a partir de um estudo paramétrico e investigações

in situ, determinaram que quanto menor for este índice, maior é o potencial de *rockburst* (Tabela 1). Tal índice é obtido pela seguinte expressão:

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (1)$$

Onde, B é a fragilidade da rocha, σ_c é a resistência à compressão uniaxial da rocha e σ_t é a resistência à tração da rocha.

Tabela 1. Classificação do potencial segundo Qiao e Tian

Valores de B	Potencial de <i>rockburst</i>
> 40	Não <i>rockburst</i>
40 – 26,7	Baixo
26,7 – 14,5	Médio
< 14,5	Violento

2.2 Critério da Tensão Tangencial - Critério de Wang *et al.*

Para a avaliação do potencial de um evento de *rockburst*, este critério utiliza a tensão tangencial máxima induzida na escavação, assim como as propriedades do maciço rochoso, isto por meio da resistência da rocha intacta (Wang & Park, 2001; Khanlari & Ali, 2011). Esta avaliação é feita por:

$$T_s = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_c} \quad (2)$$

Onde, T_s é o potencial de *rockburst*, σ_θ é a tensão tangencial máxima e σ_c é a resistência à compressão uniaxial da rocha. Wang *et al.*, (1988) sugeriram os valores apresentados na Tabela 2 para a classificação da intensidade do potencial de *rockburst*.

Tabela 2. Classificação do potencial segundo Wang *et al.*

Valores de T_s	Potencial de <i>rockburst</i>
< 0,30	Não
0,30 – 0,50	Baixo
0,50 – 0,70	Moderado
> 0,70	Violento

2.3 Critério de Rusenses

Rusenses (1974) avalia o potencial de *rockburst* considerando o estado de tensões *in situ* ao redor da escavação, a partir do qual é determinada a tensão tangencial máxima induzida. A condição

do maciço rochoso é levada em conta através da resistência da rocha intacta. O potencial é obtido com a Equação 2. Na Tabela 3 é apresentada a classificação dos eventos de *rockburst* segundo sua intensidade (Dong *et al.*, 2013).

Tabela 3. Classificação do potencial segundo Rusenses.

Valores de T_s	Potencial de <i>rockburst</i>
< 0,20	Não
0,20 – 0,30	Baixo
0,30 – 0,55	Moderado
> 0,55	Violento

2.4 Critério De Hoek & Brown

Similar aos dois critérios anteriores, o critério de Hoek & Brown (Zhou *et al.*, 2012) avalia o potencial de um evento de *rockburst*, a partir da tensão tangencial máxima induzida e a resistência da rocha intacta através da Equação 2. Na Tabela 4 é apresentada a classificação dos eventos de *rockburst* segundo sua intensidade.

Tabela 4. Classificação do potencial segundo Hoek e Brown.

Valores de T_s	Potencial de <i>rockburst</i>
< 0,34	Não
0,34 – 0,42	Baixo
0,42 – 0,56	Moderado
> 0,56	Violento

2.5 Índice de Energia de Deformação Armazenada – W_{ET}

O índice de energia armazenada W_{ET} , proposto por Kidybiński (1981), utiliza a suposição que a energia mecânica liberada de forma rápida durante o processo de *rockburst* é proporcional à energia elástica de deformação acumulada. O índice é obtido da seguinte forma:

$$W_{ET} = \frac{\phi_{SP}}{\phi_{ST}} \quad (3)$$

Onde, W_{ET} é o índice de energia armazenada, ϕ_{SP} é a energia retida (energia elástica de deformação) e ϕ_{ST} é a energia de deformação dissipada (Figura 1). Estes parâmetros são obtidos a partir das curvas de carregamento e descarregamento do ensaio de compressão uniaxial.

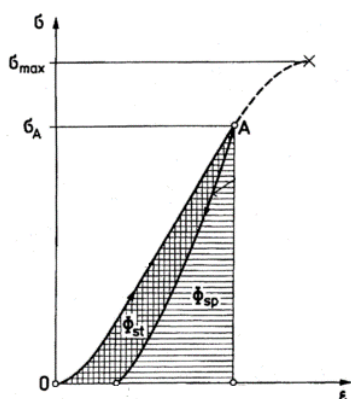


Figura 1. Cálculo W_{ET} a partir do ensaio de compressão uniaxial (modificado de Wang & Park, 2001).

Kidybiński (1981) a partir de ensaios feitos em lentes de carvão determinou o critério do potencial de *rockburst* mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação do potencial segundo Kidybiński.

Valores de W_{ET}	Potencial de <i>rockburst</i>
< 2,0	Não
2,0 – 5,0	Moderado
> 5,0	Violento

3. ANÁLISE ROC

A análise ROC é uma metodologia para visualização, organização e seleção de classificadores, baseados no seu desempenho. Esta análise tem sido muito usada na teoria de detecção de sinais para representar o equilíbrio entre os classificadores de taxas de êxito e taxas de falso alarme, também em muitos outros casos, como dados de mineração e avaliação comparativa de modelos de escorregamentos (Fawcett, 2006).

A análise ROC para avaliação do desempenho dos critérios de *rockburst* é baseado no fato que cada evento pode ser registrado utilizando uma etiqueta de classe, chamada etiqueta de classe positiva ou negativa, segundo o registro no banco de dados. Estes eventos podem ser comparados com as classes previstas pelos critérios, chamadas de etiquetas de classe verdadeira e falsa, gerando quatro resultados possíveis (Figura 2).

Na Figura 2, **p** e **n** são as etiquetas de classe positiva e negativa reais, respectivamente; **Y** e **N** são as etiquetas de classe positiva e negativa previstas pelo modelo. O valor verdadeiro positivo é denominado VP, o falso positivo FP, o falso negativo FN e o verdadeiro negativo VN.

		CLASSE REAL	
		p	n
CLASSE PREVISTA	Y	Verdadeiro Positivo	Falso Positivo
	N	Falso Negativo	Verdadeiro Negativo

Totais de coluna:

Figura 2. Matriz de confusão (modificado de Fawcett, 2006).

Se o evento registrado é verdadeiro e é classificado como positivo pelo critério de *rockburst*, então é contado como um verdadeiro positivo (existe um evento de *rockburst* e o critério prediz que há um evento); pelo contrário, se é classificado como negativo pelo critério, então é contado como um falso negativo (existe um evento de *rockburst*, mas o critério prediz que não há). De forma análoga, se obtêm o verdadeiro negativo e o falso positivo. Desta forma, é obtida a matriz de confusão apresentada na Figura 2.

3.1 Avaliação do Desempenho

Da matriz de confusão podem ser obtidas várias medições que avaliam o desempenho dos critérios de *rockburst*, como são a sensibilidade, especificidade, falso alarme e precisão, entre outras. As equações são as seguintes:

$$\text{Taxa de acerto (\%)} \quad \text{Taxa_VP(\%)} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (4)$$

$$\text{Taxa de falso alarme (\%)} \quad \text{Taxa_FP(\%)} = \frac{FP}{VN + FP} \quad (5)$$

$$\text{Precisão (\%)} \quad \text{ValorPP_VP(\%)} = \frac{VP}{VP + FP} \quad (6)$$

$$\text{Acurácia (\%)} \quad \text{Acurácia(\%)} = \frac{VP + VN}{(VP + FN) + (FP + VN)} \quad (7)$$

Taxa de acerto ou taxa de verdadeiros positivos, chamada também sensibilidade ou acurácia positiva, é definida como a relação entre os verdadeiros positivos e o total de positivos reais. A taxa de falsos positivos, chamada de **taxa de falso alarme** ou erro negativo, é definida como a relação entre os falsos positivos e o total de reais negativos. O valor positivo previsto, chamado de **precisão**, é a relação entre os

verdadeiros positivos e o total de positivos preditos. A **acurácia** é definida como a relação entre o total de positivos preditos e o total de positivos e negativos reais:

3.2 O Espaço ROC

O espaço ROC são gráficos em duas dimensões, na qual a taxa de verdadeiros positivos corresponde ao *eixo y* e a taxa de falsos positivos corresponde ao *eixo x* (Figura 3). Um gráfico ROC representa as compensações relativas entre os benefícios (verdadeiros positivos) e os custos (falsos positivos). Podem ser obtidas curvas no caso de um classificador contínuo, ou pontos (Figura 3), no caso de um classificador discreto.

No espaço ROC, o ponto que esteja mais perto do noroeste terá o melhor desempenho, portanto, um critério que avalie o potencial de *rockburst* terá um melhor desempenho do que outro se a taxa de acerto é maior que a taxa de falso alarme (pontos A e B na Figura 3 respectivamente). Por outro lado, se o classificador fica sobre a diagonal $y=x$, este classificador terá um desempenho aleatório, pois, tem a mesma probabilidade de acertar que de errar (ponto C na Figura 3). Finalmente, um classificador que apareça embaixo da diagonal (ponto D na Figura 3), terá a um desempenho não satisfatório, pior do que o classificador aleatório (Fawcett, 2006).

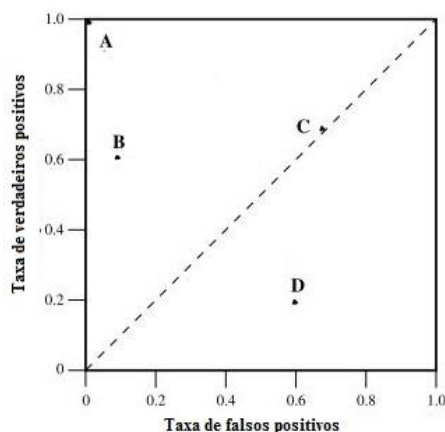


Figura 3. Gráfico ROC para classificadores discretos (modificado de Fawcett, 2006).

3.3 Banco de dados de Eventos de *Rockburst*

Como foi descrito acima, a análise ROC precisa

de dados reais a serem comparados com os dados gerados pelos critérios. Nesta dissertação foram analisados 141 casos de *rockburst* que ocorreram em diferentes locais do mundo, os quais foram recopilados de diferentes artigos. O banco de dados tem informação de resistência à compressão da rocha, resistência à tração, tensão induzida tangencial, índice de tendência de *rockburst* W_{ET} e magnitude do evento de *rockburst* (qualitativamente). Os dados são apresentados na Tabela 6.

4 RESULTADOS DA ANÁLISE ROC

A análise ROC foi dividida em duas partes, uma análise ROC para avaliar o desempenho dos critérios para prever a ocorrência ou não de um evento de *rockburst* (independentemente de sua intensidade) e uma análise ROC para avaliar o desempenho do critério para classificar a intensidade do evento de *rockburst* predito

4.1. Avaliação do Desempenho da Predição do Potencial de Ocorrência

Esta análise consiste na avaliação do desempenho dos critérios de *rockburst* na hora de prever a ocorrência de um evento, independentemente da sua intensidade, isto é, o critério prediz que há ou não há um evento de *rockburst*, sem importar se o evento pode ser classificado como Baixo, Moderado ou Violento. Foram obtidas as matrizes de confusão para cada um dos critérios anteriores. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6. Resultados da matriz de confusão.

Avaliação	Rusenses	Hoek & Brown	Wang	Qiao & Tian	W_{ET}
Verdadeiros Positivos	113	96	102	107	112
Falsos Positivos	11	5	6	22	14
Falsos Negativos	3	20	14	9	4
Verdadeiros Negativos	14	20	19	3	11
Total dados	141	141	141	141	141

Tabela 7. Banco de dados de eventos de rockburst.

No.	σ_{θ} (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	W_{ET}	Condição real de <i>Rockburst</i>	Referência
1	54,2	134	9,09	7,08	Moderado	Bai <i>et al.</i> (2002)
2	70,3	129	8,73	6,43	Moderado	
3	35	133,4	9,3	2,9	Baixo	
4	157,3	91,23	6,92	6,27	Violento	
5	30	88	3,7	6,6	Moderado	Chen <i>et al.</i> (2003)
6	98,6	120	6,5	3,8	Baixo	
7	89	236	8,3	5	Violento	
8	89,56	190,3	17,13	3,97	Moderado	Dong <i>et al.</i> (2013)
9	89,56	187,17	19,17	7,27	Moderado	
10	51,1	131,99	9,44	7,44	Moderado	
11	89	236	8,3	5	Moderado	
12	48	120	1,5	5,8	Moderado	
13	63	115	1,5	5,7	Moderado	
14	49,5	110	1,5	5,7	Moderado	
15	30,9	82,56	6,5	3,2	Baixo	
16	89	128,6	13,2	4,9	Violenta	
17	12,3	237,1	17,66	6,9	Não	
18	55,6	256,5	18,9	9,1	Moderado	
19	91,3	225,6	17,2	7,3	Violento	Dong <i>et al.</i> (2013)
20	61	171,5	22,6	7,5	Baixo	
21	34,15	54,2	12,1	3,17	Baixo	
22	108,4	138,4	7,7	1,9	Violento	
23	69,8	198	22,4	4,68	Baixo	
24	105	171,3	22,6	7,27	Violento	
25	105	237,16	17,66	6,38	Violento	
26	105	304,21	20,9	10,57	Violento	
27	25,49	54,2	2049	3,17	Baixo	
28	72,07	147,09	10,98	6,53	Moderado	
29	21,8	160	5,2	2,22	Não	
30	20,9	160	5,2	2,22	Não	
31	21,1	160	5,2	2,22	Não	
32	75	170	11,3	9	Moderado	
33	105	128,61	13	5,76	Violento	
34	105	304	9,12	5,76	Moderado	
35	105	306,58	13,9	6,38	Violento	
36	7,5	52	3,7	1,3	Não	
37	24,93	99,7	4,8	3,8	Não	
38	14,96	99,7	4,8	3,8	Não	
39	18,8	171,5	6,3	7	Não	Feng & Wang (1994)
40	34	149	5,9	7,6	Baixo	
41	38,2	53	3,9	1,6	Não	
42	11,3	90	4,8	3,6	Não	
43	92	263	10,7	8	Baixo	
44	62,4	235	9,5	9	Violento	
45	43,4	136,5	7,2	5,6	Violento	
46	11	105	4,9	4,7	Não	
47	43,62	78,1	3,2	6	Baixo	Kang (2006)
48	46,4	100	4,9	2	Baixo	Liang (2004)
49	23	80	3	0,85	Baixo	
50	46,2	105	5,3	2,3	Baixo	
51	105,5	170	12,1	5,76	Moderado	Liu <i>et al.</i> (2008)
52	105,5	190	17,1	3,97	Moderado	
53	13,9	124	4,22	2,04	Não	Qin <i>et al.</i> (2009)
54	17,4	161	3,98	2,19	Baixo	
55	19	153	4,48	2,11	Baixo	
56	19,7	142	4,55	2,26	Baixo	
57	18,7	82	10,9	1,5	Não	
58	54,2	133,99	9,09	7,08	Moderado	Su <i>et al.</i> (2010)
59	70,3	128,52	8,73	6,43	Moderado	
60	56,1	131,99	9,44	7,44	Moderado	
61	60,7	111,5	7,86	6,16	Violento	
62	90	220	7,4	7,3	Baixo	Wang <i>et al.</i> (1988)
63	55,4	176	7,3	9,3	Moderado	
64	98,6	120	6,5	3,8	Moderado	
65	18,8	178	5,7	7,3	Não	
66	11	115	5	5,7	Não	
67	48,75	180	8,3	5	Violento	
68	75	180	8,3	5	Moderado	
69	50	130	6	5	Moderado	
70	80	180	6,7	5,5	Baixo	
71	89	236	8,3	5	Moderado	
72	108,4	140	8	5,5	Moderado	
73	90	170	12,07	9	Moderado	

No.	σ_{θ} (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	W_{ET}	Condição real de Rockburst	Referência
74	90	170	12,07	9	Violento	Wang <i>et al.</i> (2004)
75	43,4	123	6	5	Moderado	
76	34	150	5,4	7,8	Não	
77	62,5	175	7,25	5	Moderado	
78	57	180	8,3	5	Moderado	
79	62,6	165	9,4	9	Moderado	
80	30	88,7	3,7	6,6	Moderado	
81	47,56	58,5	3,5	5	Baixo	Xu <i>et al.</i> (2008))
82	28,6	122	12	2,5	Moderado	
83	29,8	132	11,5	4,6	Moderado	
84	33,6	156	10,8	5,2	Moderado	
85	26,9	92,8	9,47	3,7	Moderado	
86	55,9	128	6,29	8,1	Violento	
87	59,9	96,6	11,7	1,8	Baixo	
88	68	107	6,1	7,2	Violento	
89	105,5	187	19,2	7,27	Moderado	Yang <i>et al.</i> (2010)
90	2,6	20	3	1,39	Não	
91	44,4	120	5	5,1	Baixo	
92	13,5	30	2,67	2,03	Baixo	
93	70,4	110	4,5	6,31	Moderado	
94	3,8	20	3	1,39	Não	
95	57,6	120	5	5,1	Moderado	
96	19,5	30	2,67	2,03	Moderado	
97	81,4	110	4,5	6,31	Violento	
98	4,6	20	3	1,39	Não	
99	73,2	120	5	5,1	Moderado	
100	30	30	2,67	2,03	Violento	Yi <i>et al.</i> (2010)
101	15,2	53,8	5,56	1,92	Não	
102	60	66,49	9,72	2,15	Baixo	
103	60	106,38	11,2	6,11	Baixo	
104	60	86,3	7,14	2,85	Baixo	
105	60	149,19	9,3	3,5	Baixo	
106	60	136,79	10,42	2,12	Baixo	Zhan (2007)
107	63,38	110	4,5	6,31	Moderado	
108	25,7	59,7	1,3	1,7	Não	
109	26,9	62,8	2,1	2,4	Baixo	
110	40,4	72,1	2,1	1,9	Baixo	
111	39,4	65,2	2,3	3,4	Moderado	
112	38,2	71,4	3,4	3,6	Moderado	
113	45,7	69,1	3,2	4,1	Moderado	
114	35,8	67,8	3,8	4,3	Moderado	
115	39,4	69,2	2,7	3,8	Moderado	
116	40,6	66,6	2,6	3,7	Moderado	
117	39	70,1	2,4	4,8	Moderado	
118	57,2	80,6	2,5	5,5	Violento	
119	55,6	114	2,3	4,7	Moderado	
120	56,9	123	2,7	5,2	Moderado	
121	62,1	132	2,4	5	Moderado	
122	29,7	116	2,7	3,7	Baixo	
123	29,1	94	2,6	3,2	Baixo	
124	27,8	90	2,1	1,8	Não	
125	30,3	88	3,1	3	Baixo	
126	41,6	67,6	2,7	3,7	Moderado	Zhang & Li (2009)
127	40,1	72,1	2,3	4,6	Moderado	
128	58,2	83,6	2,6	5,9	Violento	
129	56,8	112	2,2	5,5	Moderado	
130	88,9	142	13,2	3,62	Violento	
131	59,82	85,8	7,31	2,78	Moderado	
132	32,3	67,4	6,7	1,1	Não	
133	30,1	88,7	3,7	6,6	Violento	
134	148,4	66,77	3,81	5,08	Baixo	
135	132,1	51,5	2,47	4,63	Moderado	
136	127,9	35,82	1,24	3,67	Baixo	
137	107,5	21,5	0,6	2,29	Não	
138	96,41	18,32	0,38	1,87	Não	
139	167,2	110,3	8,36	6,83	Violento	
140	118,5	26,06	0,77	2,89	Baixo	
141	60	135	15,04	4,86	Baixo	

Com os resultados da matriz de confusão são obtidos os índices que avaliam o desempenho

dos critérios (Equação 4 a 7) os quais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados da avaliação dos índices de desempenho.

Índices de desempenho	Critério de Potencial de <i>Rockburst</i>				
	Rusenses	Hoek & Brown	Wang	Qiao & Tian	W _{ET}
Taxa_VP	97%	83%	88%	92%	97%
Taxa_FP	44%	20%	24%	88%	56%
Precisão	91%	95%	94%	83%	89%
Acurácia	90%	82%	86%	78%	87%

Na Tabela 8 se observa que o critério de Rusenses e o W_{ET} são os que têm uma maior taxa de acerto (*Taxa_VP*) com um valor de 97%, porém o critério W_{ET} tem uma maior taxa de falsa alarma (*Taxa_FP*) do que o critério de Rusenses, com valores de 56% e 44% respectivamente. O critério de Hoek & Brown é o que apresenta uma menor taxa de acerto (83%), no entanto, é também o critério que apresenta a menor taxa de falso alarme (20%). Os anteriores valores são visualizados na curva ROC (Figura 4).

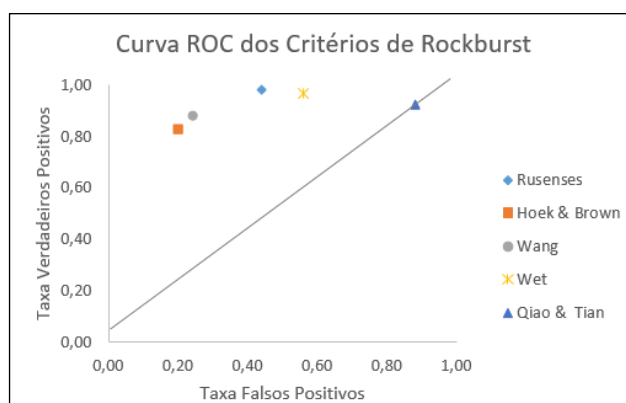


Figura 4. Espaço ROC dos critérios de *rockburst*.

4.2 Avaliação do Desempenho da Predição das Intensidades

Esta análise consistiu na avaliação do desempenho do critério de *rockburst* na hora de prever a intensidade do evento, isto é, quando o critério prediz que há um potencial de *rockburst*, este potencial é classificado de acordo a uma intensidade, que pode ser Baixa, Moderada ou Violenta. Baseados nisso, foi gerada uma matriz de confusão para cada uma das intensidades e foram avaliados os índices de desempenho para cada um dos critérios envolvidos nesta pesquisa. Os resultados são apresentados na Figura 5.

CONCLUSÕES

O critério com o melhor desempenho para prever a ocorrência de um evento de *rockburst* foi o critério de Rusenses, seguido pelo critério de Hoek & Brown. Isto porque, embora o critério de Rusenses apresente uma maior taxa de falso alarme do que o critério de Hoek & Brown (44% v.s. 20%), ele tem uma maior taxa de acerto (97% v.s. 83%) além de uma maior acurácia (90% v.s. 82%). O seguinte critério em termos de desempenho foi o critério de Wang, seguido pelo critério do W_{ET}. O critério que apresentou o desempenho menos satisfatório foi o critério de Qiao & Tian.

Quanto à predição da intensidade do evento, o critério de Rusenses apresenta bons resultados para Violento e Moderado (taxa de acerto de 59% e 50% respectivamente), sendo mais conservativo o primeiro, pois tem uma menor taxa de acerto. O anterior quer dizer, que a probabilidade de que o critério acerte a intensidade Moderada ou Violenta de um evento de *rockburst* é alta, porém poderia apresentar-se erro na hora de classificar a intensidade como Baixo, pois nesta intensidade a taxa de falso alarme é igual à taxa de acerto.

O critério de Hoek & Brown e Wang, embora tenham uma alta probabilidade de prever a ocorrência do evento de *rockburst*, quando prever a intensidade, tem uma baixa taxa de acerto, pois todas são menores que 50% e, similar ao critério de Rusenses, o critério de Hoek & Brown para classificar um evento com uma intensidade Baixa, tem grande probabilidade de errar, pois a taxa de acerto foi de somente 22%.

O critério de Qiao & Tian pode gerar muitos erros quando prever a intensidade, por isso os intervalos de classificação do critério precisam de uma revisão. Finalmente, o critério W_{ET} tem um bom desempenho na hora de classificar o evento, pois na categoria Violento tem uma taxa de acerto de 83%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq pelo apoio econômico para a realização desta pesquisa.

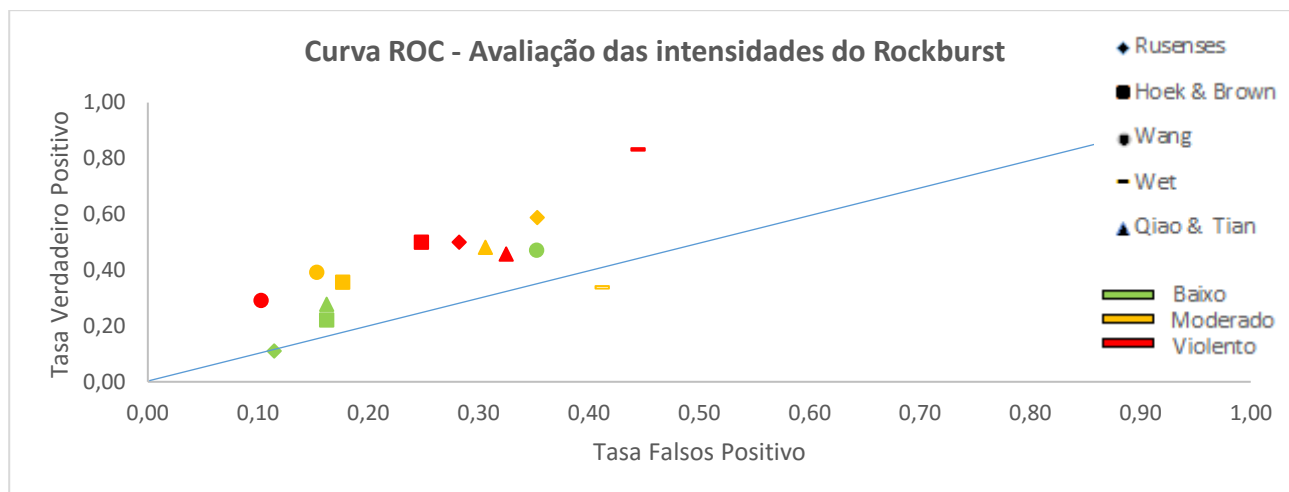


Figura 5. Curva ROC da avaliação do desempenho das intensidades dos critérios.

REFERÊNCIAS

- Bai, M.Z., Wang, L.J. & Xu, Z.. (2002). Study on neural network model ant its application in predicting the risk of rockburst. *China Saf. Sci. J.*, 4: 65–69.
- Blake, W. & Hedley, D.G.F. (2009). *Rockburst: Case Studies from North Amreican Hard-Rock Mines*. Electronic. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SEM), Littleton, CO, USA.
- Chen, H., Li, N., Nie, D. & Shang, Y. (2003). Prediction of rockburst by artificial neural network. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 22(5): 762–768.
- Dong, L., Li, X. & Peng, K. (2013). Prediction of rockburst classification using random forest. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23(November 2011): 472–477.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to roc analysis. *Pattern Recognit. Lett.*, 27: 861–874.
- Feng, X.T. & Wang, L.N. (1994). Rockburst prediction base on networks. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 4: 7–14.
- Hoek, E. (2000). *Rock Engineering*.
- Hou, F., Liu, X. & Wang, M.C. (1992). Re-analysis of rockburst mechanism and discussion on the gradation of the rockburst intensity. *CSRME ed. Proc. Third Natl. Conf. Rock Dyn. Wuhan Univ. Mapp. Technol. Press*, : 448–457.
- Kang, Y. (2006). Research on relevant problems about failure mechanism of surrounding rock ind deep buried tunnel. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*: 118–120.
- Khanlari, G.R. & Ali, B. (2011). Analysis of rock burst in critical section of second part of karaj- tehran water supply tunnel : 661–667.
- Kidybiński, a. (1981). Bursting liability indices of coal. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18: 295–304.
- Liu, Z.Y., Yuan, Q.. & Li, J.L. (2008). Application of fuzzy probability model to prediction of classification of rockburst intensity. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, : 3095–3103.
- Qiao, C.S. & Tian, Z.Y. (1998). Study of the possibility of rockburst in dong-gua-shan copper mine. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 17: 917–921.
- Qin, S.W., Chen, J.P. & Wang, Q. (2009). Research on rockburst prediction with extenics evaluation base on rough set. *Int. Symp. Rockburst Seism. Mines*, : 937–944.
- Rusenses, B.F. (1974). *Analysis of Rock Spalling for Tunnels in Steep Valley Sides (In Norwegian)*. M.Sc. Theses. Departament of Geology, Norwegian Institute of Technology.
- Su, G.S., Zhan, Y. & Chen, G.Q. (2010). Indefity rockburst grades for jinping hydropower station using gaussian ii process for binary classification. *Proc. 2010 Int. Conf. Comput.*, : 364–367.
- Wang, J. a. & Park, H.D. (2001). Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 16: 49–57.
- Wang, X., Gu, Y.L. & Kang, Y. (2004). Application of bp neural network into prediction of rockburst in tunneling. *Proc. 2004 Int. Symp. Saf. Sci. Technol.*, 4: 617–621.
- Wang, Y.H., Li, W.D. & Li, Q.G. (1988). Fuzzy estimation method of rockburst prediction. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 17: 493–501.
- Xu, M.G., Yao, G.H. & Liu, Z.P. (2008). Rockburst prediction of chengchao iron mine during deep mining. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, : 2921–2928.
- Yang, J., Li, X.B. & Zhou, Z.. (2010). A fuzzy assessment method of rock-burst prediction based on rough set theory. *Met. Mine*, 6: 26–29.
- Yi, Y.L., Cao, P. & Pu, C.Z. (2010). Multi-factorial comprehensive estimation for jinchans deep typical rockburst tendency. *Sci. Technol. Rev.*, 28: 76–80.
- Zhan, J.F. (2007). Study on prediction by stages and control technology of rockburat hazard of daxiangling highway tunnel. *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2, : 89–93.
- Zhang, L.X. & Li, C.H. (2009). Study on tendency analysis of rockburst and comprehensive prediction of differents types of surrounding rock. *Proc. 13th Int. Symp. Rockburst Seism. Mines*, : 1451–1456.
- Zhou, J., Li, X. & Shi, X. (2012). Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines. *Saf. Sci.*, 50(4): 629–644.