

Um modelo preditivo para a abrasividade de rochas ornamentais baseado em parâmetros mineralógico-mecânicos

A predictive model for the abrasiveness of ornamental stones based on mineralogical-mechanical parameters

Luan Lamon Machado
Bolsista PCI, Eng. Mecânico

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira
Supervisor, Geólogo, D. Sc.

Resumo

A eficiência do beneficiamento de rochas ornamentais e a durabilidade de ferramentas diamantadas dependem fortemente da abrasividade do material, cuja predição é um desafio de alto valor industrial. Ensaios pontuais, como a microdureza Knoop, apresentam limitações frente à heterogeneidade das rochas. Como alternativa, este trabalho propõe e valida o Teor de Quartzo Equivalente (EQC) e o Índice de Abrasividade da Rocha (RAI) como parâmetros preditivos integrados. Os índices foram calculados a partir de dados petrográficos e de resistência à compressão uniaxial (UCS), sendo correlacionados a ensaios de desgaste Amsler. A regressão revelou correlação inversa entre o EQC e o desgaste ($R^2 = 0,81$). O modelo mais robusto foi obtido com o RAI, que combina efeitos mineralógicos e mecânicos, alcançando $R^2 = 0,88$. Conclui-se que o RAI é um preditor consistente da abrasividade efetiva, oferecendo base confiável para a classificação de materiais e otimização de processos industriais.

Palavras-chave: abrasividade; rochas ornamentais; desgaste amsler.

Abstract

The efficiency of ornamental stone processing and the durability of diamond tools strongly depend on the material's abrasiveness, the prediction of which remains an industrially significant challenge. Localized tests, such as Knoop microhardness, show limitations given the heterogeneity of rocks. As an alternative, this study proposes and validates the Equivalent Quartz Content (EQC) and the Rock Abrasivity Index (RAI) as integrated predictive parameters. These indices were calculated from petrographic data and uniaxial compressive strength (UCS) values and were correlated with Amsler wear test results. Regression analysis revealed an inverse correlation between EQC and wear ($R^2 = 0.81$). The most robust predictive model was obtained with RAI, which combines mineralogical and mechanical effects, achieving $R^2 = 0.88$. We conclude that RAI is a consistent predictor of effective abrasiveness, providing a reliable basis for material classification and industrial process optimization.

Keywords: abrasiveness; ornamental stones; amsler wear.

1. Introdução

A competitividade da indústria de rochas ornamentais está intrinsecamente ligada à otimização de seus processos de extração e beneficiamento. Neste cenário, a abrasividade da rocha emerge como uma propriedade tecnológica dominante, governando o desgaste de ferramentas de corte, o consumo de energia e as velocidades de processamento, impactando diretamente os custos operacionais e a viabilidade econômica da exploração de novas jazidas (SILVEIRA, MACHADO E MOREIRA, 2023).

Historicamente, a quantificação da dureza dos componentes minerais de uma rocha recorre a ensaios de microdureza, como Knoop e Vickers. Tais métodos, embora precisos em escala microscópica, enfrentam desafios conceituais para prever o comportamento abrasivo global de um material geológico. A principal limitação reside na dissonância de escala entre a medição pontual (micrométrica) e o processo de desgaste macroscópico, que envolve a interação de toda a superfície da rocha com a ferramenta. A heterogeneidade mineralógica, textural e estrutural das rochas induz uma alta dispersão nos resultados de microdureza, tornando a extrapolação para o desempenho global pouco confiável (PLINNINGER; SPAUN; THURO, 2002).

Como resposta a esta lacuna, este trabalho investiga uma abordagem fundamentada em parâmetros volumétricos, que representam a rocha em sua integralidade. O Teor de Quartzo Equivalente (EQC) é proposto como um indicador da dureza abrasiva intrínseca da rocha, ponderando a contribuição de cada fase mineral. Adicionalmente, o Índice de Abrasividade da Rocha (RAI) é avaliado como um parâmetro composto, que incorpora não apenas a mineralogia (via EQC), mas também a competência mecânica da rocha, representada pela Resistência à Compressão Uniaxial (UCS). Dessa forma, busca-se oferecer uma interpretação unificada e tecnicamente consistente do comportamento abrasivo de materiais líticos, integrando aspectos mineralógicos e mecânicos em um mesmo referencial metodológico.

2. Objetivos

Validar sistematicamente o Teor de Quartzo Equivalente (EQC) e o Índice de Abrasividade da Rocha (RAI) como preditores da abrasividade, por meio da correlação com dados de desgaste obtidos em ensaios Amsler, visando oferecer à indústria uma ferramenta mais fidedigna para a caracterização tecnológica de materiais líticos.

3. Material e Métodos

3.1. Base de dados

Os dados de composição mineralógica (percentuais volumétricos), resistência à compressão uniaxial (UCS) e desgaste Amsler foram extraídos do Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo (SARDOU FILHO et al., 2013). A diversidade de litotipos na base de dados, abrangendo desde rochas silicáticas de alta dureza a carbonáticas de dureza moderada, garante a robustez e ampla validade da análise.

Tabela 1. Composição mineralógica volumétrica das rochas ornamentais estudadas (%).

Rocha	Composição Mineralógica
Arabesco	33% Microclínio, 27% Quartzo, 20% Oligoclásio, 10% Granada, 7% Biotitas
Preto São Gabriel	60% Andesina, 15% Hipersteno, 15% Biotita, 5% Hornblende, 5% Quartzo
Verde Ubatuba	30% Andesina, 30% Microclínio, 15% Quartzo, 13% Biotita, 7% Hornblende, 5% Piroxênio
Ocre Itabira	45% Microclinio, 20% Andesina, 14% Hornblende, 7% Biotita, 5% Quartzo, 4% Titanita
Cinza Bressan	33% Andesina, 30% Microclínio, 27% Quartzo, 8% Biotita, 2% Acessorios
Cinza Castelo	30% Microclínio, 27% Oligoclásio, 23% Quartzo, 17% Biotita, 3% titanita
Prata Imperial	40% Oligoclease, 24% Microclínio, 17% Quartzo, 12% Biotita, 2% Titanitas, 5% Opacos
Café Brasil	57% Microclínio, 25% Quartzo, 11% Plagioclasio, 7% Biotita
Preto Absoluto	55% Andesina, 15% Diopsídio, 15% Biotita, 5% Hipersteno, 5% Apatita, 5% Opacos
Preto Aracruz	55% Oligoclásio, 18% Microclínio, 17% Biotita, 5% Quartzo, 5% Acessórios
Verde Bahia	35% Andesina, 27% Feldspato, 15% Quartzo, 10% Hipersteno, 5% Hornblende, 3% Biotita
Branco Marfim	38% Feldspato, 27% Quartzo, 18% Plagioclásio, 7% Sillimanite, 5% Biotita, 5% Granada
Indigo	28% Plagioclásio, 28% Microclínio, 24% Quartzo, 15% Granada, 5% Biotita
Branco Polar	45% Microclínio, 35% Quartzo, 20% Plagioclásio, 5% Granada
Prata Classico	35% Microclínio, 30% Plagioclásio, 25% Quartzo, 15% Biotita
Branco Romano	48% Microclínio, 30% Quartzo, 10% Plagiogclásio, 5% sillimanite, 5% Granada
Crema Bordeaux	40% Microclínio, 30% Plagioclasio, 25% Quartzo, 15% Biotita
Branco Saara	30% Feldspato, 30% Albita, 30% Quartzo, 10% Granada
Branco Serenata	36% Feldspato, 27% Plagioclasio, 26% Quartzo, 6% Granada, 5% outros
Branco Siena	35% Microclínio, 25% Oligoclase, 25% Quartzo, 10% Granada, 5% Biotita
Icarai Light	45% Microclínio, 35% Quartzo, 7% Oligoclase, 5% Biotita, 5% Granada, 3% Sillimanite
Cinza Andorinha	30% Microclínio, 30% Plagioclásio, 16% Biotita, 20% Quartzo, 4% Titanita
Cinza Corumbá	33% Microclínio, 30% Plagioclásio, 12% Biotita, 20% Quartzo, 5% acessórios
Ouro Negro	70% Andesina, 15% Piroxênio, 5% Magnetita, 5% Hornblende, 5% Biotita
Preto Águi Branca	42% Andesina, 25% Biotita, 20% Hornblende, 10% Opacos, 3% Apatita
Juparaná Premium	35% Quartzo, 28% Microclínio, 17% Oligoclase, 15% Biotita, 5% Granada
Verde Amazonas	27% Quartzo, 40% Feldspato, 20% Oligoclase, 4% Hipersteno, 3% Hornblende, 3% Biotita, 2% Diopsídio
Verde Butterfly	50% Ortoclásio, 30% Oligoclase, 12% Quartzo, 8% Piroxênio
Verde Pavão	45% Microclínio, 30% Oligoclase, 20% Quartzo, 5% Granada, 5% Piroxênio
Verde Volcano	40% Andesina, 20% Quartzo, 12% Biotita, 10% Hornblende, 5% Feldspato, 5% Hiprestemp
Crema Bordeaux	40% Oligoclease, 30% Quartzo, 30% Microclínio, 5% acessórios
Topázio	35% Plagioclásio, 17% Quartzo, 12% Microclínio, 6% Titanita, 4% Apatita, 3% Hornblende, 16% Biotita, 1% Allanita, 1% Muscovita
Amarelo Cachoeiro	40% Microclínio, 25% Quartzo, 25% Andesina, 15% Biotita, 5% Muscovita
Cinza Prata	34% Microclínio, 23% Oligoclase, 8% Biotita, 1% Titanita, 0.3% Allanita, 29% Quartzo, 0.2% Apatita, 1% Muscovita
Amarelo Icarai	45% Microclínio, 27% Quartzo, 10% Biotita, 8% Plagioclásio, 7% Granada, 3% Acessórios
Amarelo Veneziano	45% Microclínio, 30% Quartzo, 16% Oligoclase, 5% Biotita, 4% Acessórios
Amendoa Clássico	33% Microclínio, 27% Plagioclásio, 25% Quartzo, 15% Biotita
Gegrége	45% Ortoclase, 30% Quartzo, 16% Plagioclásio, 5% Biotita, 4% Granada
Giallo N. Golden	45% Feldspato, 40% Quartzo, 10% Biotita, 5% Opacos
Juparaná Imperial	40% Microclínio, 25% Quartzo, 25% Oligoclase, 10% Granada, 5% Biotita
Juparaná Sunny	38% Feldspato, 27% Quartzo, 18% Plagioclásio, 7% Sillimanita, 5% Biotita, 5% Granada
Ouro Brasil	45% Feldspato, 25% Quartzo, 20% Plagioclásio, 5% Biotita, 5% Granada
Azul Acqua Marina	45% Calcita, 25% Dolomite, 15% Diopsídio, 10% Forsterite, 5% Plagioclásio
Azul Capixaba	98% Calcita, 1% Diopsídio, 1% Wollastonite
Branco Azulado	90% Dolomite, 5% Calcita, 5% Apatita
Branco Classico	100% Dolomite
Chocolate	90% Calcita, 10% Quartzo, 5% Feldspato, 5% Zircão
Champagne	85% Dolomite, 15% Calcita, 5% Apatita
Branco Rajado	85% Dolomite, 15% Calcita, 5% Apatita
Pinta Verde	90% Dolomite, 5% Calcita, 5% Apatita
Branco Neve	85% Dolomite, 1 5% Calcita, 5% Apatita
Medusa	100% Dolomite
Branco Cintilante	85% Dolomite,1 5% Calcita, 5% Apatita
Gaya White	85% Quartzo, 15% Fuchsite
Azul Macaubas	82% Quartzo, 8% Dumortierite, 5% Muscovita, 5% Cianita
Acqua Unique	85% Quartzo, 15% Fuchsite
Sunset	92% Calcita, 5% Flagonita, 3% Quartzo
Xango	95% Quartzo, 5% Epidote
Verde Rei Imperial	43% Quarzo, 24% Plagioclásio, 15% Epidote, 7% Microclínio, 5% Anfibóli
Marron Madeira	80% Quartzo, 5% Plagioclásio, 5% Muscovita
Capucino	70% Quarzo, 30% Feldspato
Macambira	45% Quartzo, 25% Plagioclásio, 15% Granada, 10% Epidot
Mandala	85% Calcita, 5% Feldspato, 5% Quartzo, 5% Apatita
Iguana	74% Quartzo, 16% Epidote, 5% Granada, 3% Plagioclásio, 2% Microclínio
Superlative	85% Carbonato, 5% Muscovita, 5% Quartzo, 5% Pirita
Madeira Gold	40% Microclínio, 25% Quartzo, 30% Andesina, 5% Granada
Juparana Linhares	30% Plagioclásio, 20% Quartzo, 15% Feldspato, 15% Granada, 5% Zircão, 10% Biotita
Branco Ipanema	35% Quartzo, 35% Mesopertita, 20% Oligoclase, 5% Biotita, 5% Granada
Santa Cecilia	34% Feldspato, 25% Quartzo, 20% Plagioclásio, 10% Biotita, 7% Granada, 4% Acessórios
Kashimire White	65% Feldspato, 25% Quartzo, 5% Plagioclásio, 5% Granada
Branco Dallas	67% Feldspato, 24% Quartzo, 5% Granada, 4% Plagioclásio

3.2. Cálculo teor de quartzo equivalente (EQC)

O EQC foi determinado pela soma ponderada da fração volumétrica de cada mineral (A_i) por sua respectiva dureza de Rosiwal (R_i), conforme a Equação 1:

$$EQC = \sum_{i=1}^n (A_i \times R_i) \quad (1)$$

A escala de Rosiwal, adequada para quantificar a resistência relativa ao desgaste abrasivo, foi estimada a partir da dureza Mohs por meio de relação empírica proposta por Najmedin Almasi et al. (2017) conforme Equação 2.

$$R_i = 0,0291 \times e^{1,1646 \times H_{Mohs,i}} \quad (2)$$

Os valores de dureza Mohs para os minerais identificados nas amostras foram agrupados em faixas, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Escala de dureza Mohs para os minerais identificados nas amostras.

Faixa de Dureza (Mohs)	Identificação do Mineral
2 – 3	Biotita, Flogopita, Fuchsita, Muscovita
3 – 4	Calcita, Carbonato (genérico), Dolomita
4 – 5	Apatita, Cianita, Hiperstênio, Wollastonita
5 – 6	Allanita, Anfibólio (genérico), Diopsídio, Epidoto, Hornblenda, Opacos (genérico), Piroxênio (genérico), Titanita (Esfeno)
6 – 7	Albita, Andesina, Dumortierita, Feldspato (genérico), Forsterita (Olivina), Granada, Mesopertita, Microclínio, Oligoclásio, Ortoclásio, Pírita, Plagioclásio (genérico), Quartzo, Sillimanita, Zircão

3.3. Cálculo do índice de abrasividade da rocha (RAI)

O RAI foi calculado segundo a formulação de Plinninger (2002), integrando mineralogia e mecânica da rocha conforme a equação 3.

$$RAI = EQC \times UCS \quad (3)$$

Onde UCS (em MPa) representa a resistência à compressão uniaxial da rocha, refletindo a coesão mecânica da matriz litológica. Contudo, sugere-se que ao incorporar parâmetros granulométricos e ajustes, o modelo pode apresentar melhor aderência na predição da abrasividade.

$$RAI = EQC^\alpha \times UCS^\beta \times d^\delta \quad (4)$$

4. Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os valores calculados de Conteúdo de Quartzo Equivalente (EQC), Resistência à Compressão Uniaxial (UCS), Índice de Abrasividade da Rocha (RAI) e desgaste pelo ensaio Amsler para 68 amostras de mármores e granitos, com dados derivados do Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo (SARDOU FILHO et al., 2013).

Tabela 3. Parâmetros físico-mecânicos e desgaste das rochas ornamentais.

Amostra	EQC	UCS	RAI	Desgaste	Amostra	EQC	UCS	RAI	Desgaste
Azul Capixaba	1%	86,4	1,132	6,92	Santa Cecilia	53%	103,6	55,043	0,6
Branco Classico	3%	120,8	3,576	3,89	Cinza Castelo	54%	132,1	71,532	1
Medusa	3%	120,8	3,576	3,89	kashimire White	54%	176,4	95,997	0,83
Branco Rajado	3%	80,3	2,513	8,08	Juparaná Persa	57%	112,3	63,865	0,92
Champagne	3%	84,8	2,654	8,08	Indigo	57%	164,27	94,160	0,85
Branco Cintilante	3%	84,8	2,654	8,08	Verde Butterfly	58%	138,3	79,841	0,8
Branco Neve	3%	84,8	2,654	8,08	Verde rei imperial	59%	193,18	114,266	0,87
Acinzentado	3%	86,4	2,756	6,92	Cinza Prata	59%	149,3	88,684	0,83
branco comum	3%	86,4	2,756	6,92	Amarelo Cachoeiro	60%	150,8	90,420	0,94
Branco Azulado	3%	86,4	2,756	6,92	Cinza Bressa	61%	212,37	128,972	0,84
Pinta Verde	3%	86,4	2,756	6,92	Café Brasil	62%	126	77,490	0,77
Sunset	4%	119,9	4,592	3,31	Icaraí Light	63%	102,7	64,188	0,8
Superlative	8%	86,7	7,291	3,06	Amarelo Veneziano	63%	117,1	73,234	0,95
Azul Acqua Marina	17%	113	19,210	3,11	Branco Marfim	64%	82	52,808	0,8
Chocolate	21%	69	14,380	4,02	Amarelo Icaraí	66%	127,2	83,443	1
Preto Aguia Branca	30%	89,6	26,432	1,8	Gegrége	66%	171,84	112,847	0,66
Preto Absoluto	36%	113,3	40,357	2,02	Crema Bordeaux	67%	138,7	93,484	1,41
Topázio	37%	135,1	49,366	0,94	Juparaná Premium	67%	93,3	62,884	0,8
Preto São Gabriel	41%	77,25	31,402	1,76	Verde Pavão	70%	125,03	87,684	1
juparaná Sunny	43%	82	35,572	0,8	madeira gold	71%	88	62,700	1,68
Ouro Brasil	44%	152	67,138	1,76	Branco Saara	72%	153,3	110,683	1
Verde Bahia	44%	135,1	59,984	0,81	Verde Eucalipto	72%	167,98	121,685	1,2
Preto Aracruz	45%	113,95	51,072	0,86	Arabesco	73%	107,8	78,414	0,7
Cinza Andorinha	45%	151,5	68,175	1	Branco Polar	73%	168,1	123,520	1,08
Ocre Itabira	45%	121	54,813	0,91	Branco Siena	75%	128,9	96,031	0,8
Verde Volcano	46%	133,6	62,057	1,2	Branco Romano	76%	146,9	111,527	1,4
Cinza Corumbá	47%	130,2	60,803	1	Juparaná Imperial	77%	109,8	84,875	1,26
Ouro Negro	47%	111,3	52,255	1,4	Capuccino	77%	101,7	78,716	0,75
Verde Ubatuba	50%	146	73,146	0,35	Marrom Madeira	80%	130,39	103,790	0,823
Amendoa Classico	51%	132,1	67,001	0,7	Macambira	81%	139,87	112,875	0,59
Verde Amazonas	51%	106,6	54,281	0,76	Acqua unique	83%	186,1	154,463	0,56
Branco Ipanema	51%	141,3	72,105	1,54	Gaya White	83%	186,1	154,537	0,56
Prata Imperial	52%	127,7	66,276	1,3	Iguana	88%	148,38	130,248	0,5
Giallo Napoleone Golden	53%	142,2	75,082	0,63	Azul Macaubas	125%	210,2	262,540	0,54

A análise de regressão linear entre o Teor de Quartzo Equivalente e a resistência à compressão uniaxial (UCS) evidenciou uma correlação fraca, expressa por um baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,37$). A equação de regressão ajustada é apresentada na Equação 5, enquanto a distribuição dos dados e o ajuste linear são ilustrados na Figura 1.

$$UCS = 74,319 \text{ EQC} + 89,301 \quad (5)$$

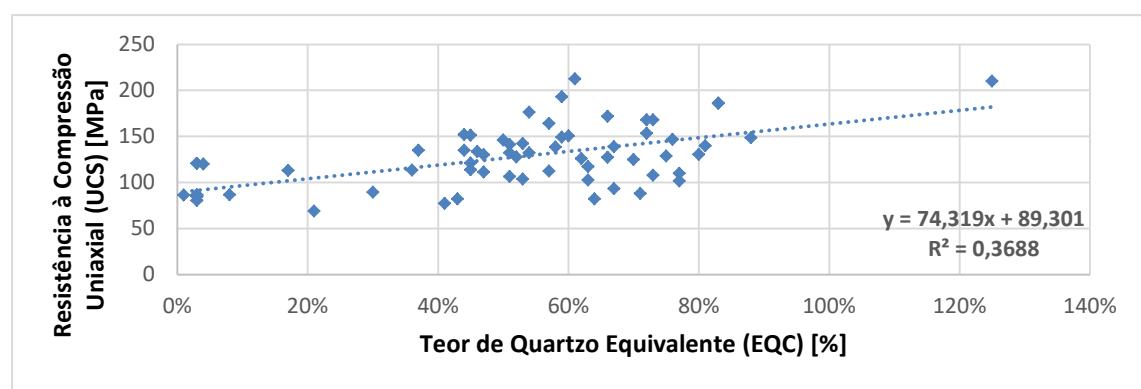


Figura 1. Relação entre EQC e UCS.

Conforme mostrado na Figura 1, a ampla dispersão dos dados indica que a resistência mecânica das rochas não se explica apenas pela composição mineralógica. Características microestruturais, como porosidade, intertravamento dos grãos, orientação dos planos de clivagem e presença de microfissuras, influenciam de forma significativa a UCS, limitando a capacidade do modelo em predizer com precisão a resistência das rochas.

Em contrapartida, observa-se na Figura 2 uma forte correlação inversa entre o EQC e o desgaste Amsler, com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,81$). A relação matemática ajustada é apresentada na Equação 6.

$$\text{Desgaste} = 0,6668 \times EQC^{0,629} \quad (6)$$

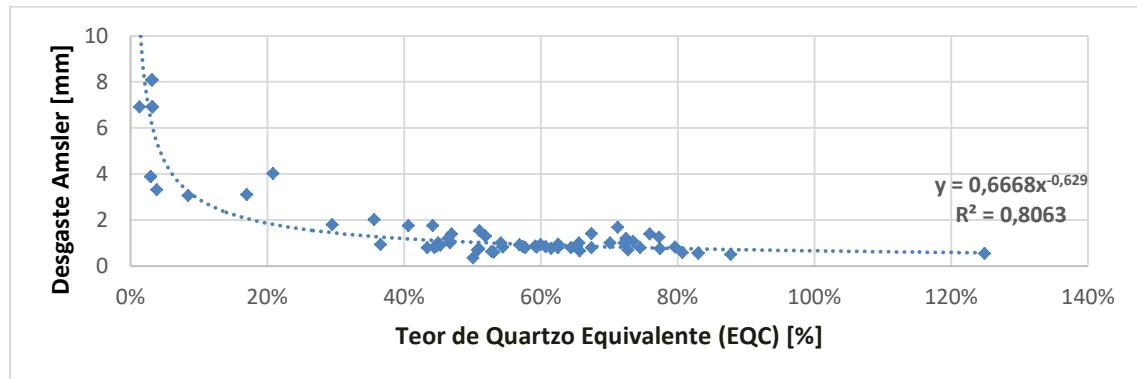


Figura 2. Relação entre EQC e Desgaste Amsler.

Esse resultado evidencia que rochas com maior teor de quartzo apresentam menor desgaste volumétrico, destacando a contribuição significativa dos minerais duros na resistência ao atrito e na durabilidade superficial do material. Sob a ótica tribológica, as fases minerais mais duras atuam como microcortantes, limitando o volume removido durante o atrito. Entretanto, do ponto de vista industrial, essa maior resistência ao desgaste se traduz em maior abrasividade do material, ocasionando maior desgaste das ferramentas diamantadas empregadas no beneficiamento.

O modelo preditivo mais robusto foi aquele que relacionou o Índice de Abrasividade da Rocha ao desgaste Amsler, apresentando um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,88$, conforme ilustrado na Figura 3 e expresso pela Equação 7. A média dos resíduos foi de 0,087, indicando ausência de viés sistemático, enquanto o desvio padrão dos resíduos, de 0,77, evidencia uma dispersão relativamente baixa em relação à variação observada do desgaste (0,35–8,08). Além disso, o resíduo padronizado médio de 0,114 (aproximadamente 11% do desvio padrão) demonstra que os desvios individuais são reduzidos frente à variabilidade global do modelo, corroborando sua consistência estatística.

$$\text{Desgaste} = 10,895 \times RAI^{0,566} \quad (7)$$

A superioridade do RAI decorre de sua natureza integrada, combinando o efeito mineralógico do EQC com a resistência mecânica representada pela UCS. Rochas com alto EQC e baixa UCS tendem à desagregação granular precoce, enquanto aquelas com alta UCS mantêm os grãos duros em contato prolongado com a ferramenta, intensificando o desgaste. Essa análise confirma a consistência do modelo como ferramenta quantitativa para a engenharia de processos, permitindo classificar litotipos quanto à sua cortabilidade e orientar

a seleção de ferramentas diamantadas, considerando variáveis operacionais. Apesar da alta preditividade, o modelo ainda é aproximado, pois não considera características texturais como granulometria, forma e angularidade dos grãos, que também influenciam o desgaste.

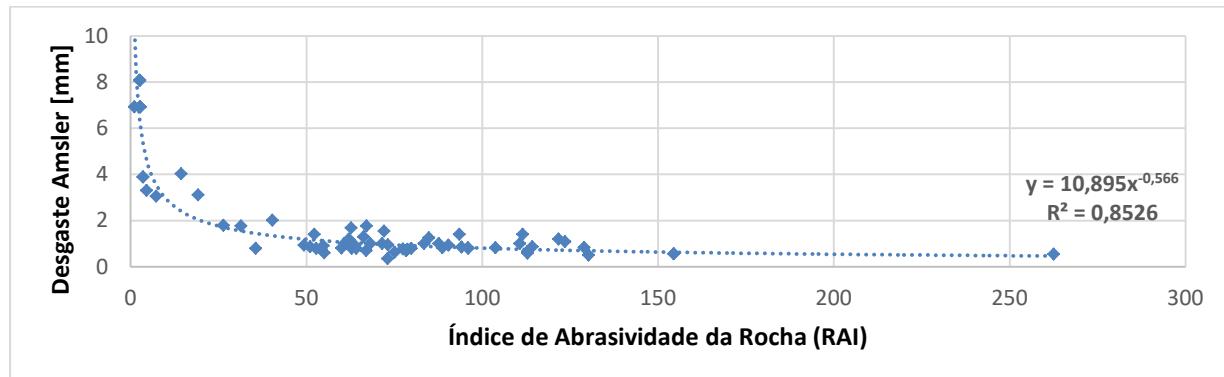


Figura 3. Relação entre RAI e Desgaste Amsler.

5. Conclusão

A abrasividade das rochas ornamentais impacta diretamente a eficiência do beneficiamento e a vida útil das ferramentas diamantadas. Este estudo confirmou que o Teor de Quartzo Equivalente (EQC) e o Índice de Abrasividade da Rocha (RAI) são parâmetros preditivos eficazes, sendo o RAI o mais preciso ao integrar atributos mineralógicos e mecânicos. A relação inversa forte entre EQC e desgaste Amsler, assim como o elevado coeficiente de determinação do modelo com RAI, demonstram a robustez desses índices para caracterização tecnológica e otimização dos processos industriais.

Para avanços futuros, recomenda-se comparar diretamente os modelos baseados em EQC e RAI com dados experimentais de dureza microdureza Knoop, permitindo validar e potencialmente aprimorar os índices preditivos. Além disso, a inclusão de parâmetros granulométricos, textura e microestrutura poderá refinar a modelagem da abrasividade, ampliando a aplicabilidade dos índices na indústria de rochas ornamentais.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo nº 301498/2025-3).

7. Referências Bibliográficas

- NAJMEDIN ALMASI, S. et al. Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 76, n. 4, p. 1593-1607, 2017.
- PLINNINGER, R.J.; SPAUN, G.; THURO, K. **Prediction and classification of tool wear in drill and blast tunnelling**. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT, 9., 2002, Durban, South Africa. Proceedings... Durban: IAEG, 2002. p. 16-20.
- SARDOU FILHO, R. et al. **Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo**. Brasília: CPRM, 2013. 349p.
- SILVEIRA, L.L.L. da; MACHADO, L.L.; MOREIRA, B.C. **Simulador de desgaste de pérolas diamantadas: aspectos construtivos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. (Série Rochas e Minerais Industriais, 33).