

ESTUDO DA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE CORTE DE FIO DIAMANTADO NA EXTRAÇÃO DE GRANITOS COMERCIAIS

D.B. Marcon¹; N. F. Castro¹; F.W.H. Vidal¹

RESUMO - O fio diamantado é a tecnologia de corte de rochas ornamental mais difundida no mundo atualmente. Sua utilização nas pedreiras brasileiras teve início na década de 90, intensificando-se nos últimos 10 anos. Seu desenvolvimento foi embasado, principalmente, no empirismo, necessitando-se, atualmente, de estudos de campo, junto às empresas com o objetivo de avaliar a tecnologia de fio diamantado, cortes realizados, equipamentos utilizados e parâmetros envolvidos no processo. Para a realização deste trabalho foi feito um estágio em uma pedreira e visitas a outras cinco, onde foi possível a coleta de dados referentes ao corte de 5 tipos de rocha. Os dados coletados foram lançados em planilhas e analisados. A partir da pesquisa realizada, pode-se descrever aspectos da utilização do fio diamantado, tais como, cortes realizados, princípio de funcionamento, tipo de fio e máquinas de fio utilizadas, além da evidência de diversos parâmetros que afetam o corte com fio e a avaliação do desempenho do fio. Através da análise dos dados coletados, tentou-se correlacionar alguns dos parâmetros envolvidos, como rendimento e área de rocha cortada, rendimento e dimensão de arrasto e a comparação entre cortes horizontais e verticais. Neste estudo pode-se verificar que o fio diamantado é vantajoso para o corte de granito, especialmente para cortes de grandes superfícies, considerando sua maior produtividade e menor custo operacional. Diversos são os parâmetros que influenciam o corte com fio diamantado, sendo esses parâmetros controláveis e não controláveis. Observou-se, com dados coletados em campo, uma tendência de aumento de rendimento com aumento da área e da superfície de arrasto, no entanto essa relação é limitada pela potência da máquina. Os cortes verticais e horizontais analisados não apresentaram diferença expressiva quanto aos seus desempenhos.

Palavras-chave: Fio diamantado; granitos comerciais; lavra.

¹Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTI. Rod. Cachoeiro – Alegre, km 05, Cachoeiro de Itapemirim, ES, CEP 29300-970. dbortolote@cetem.gov.br; ncastro@cetem.gov.br; fhollanda@cetem.gov.br

1. INTRODUÇÃO

A partir de 1977, iniciou-se a utilização dos fios diamantados nas pedreiras de mármore de Carrara na Itália, tendo seu uso voltado exclusivamente para mármore e travertinos. Após 10 anos de evolução tecnológica passou a ser utilizados também nas pedreiras de granitos na região da Sardenha, no fim dos anos 80 (Regadas, 2006). O fio diamantado surgiu para substituir as inconveniências técnicas do fio helicoidal, principalmente no que diz respeito ao corte de rochas resistentes como os granitos - materiais com grande diversidade cromática e maior resistência que os mármore - que obteve a intensificação da sua demanda mundial a partir dos anos 80 (Qualhano, 2005). A aplicação do fio diamantado nas pedreiras brasileira começou na década de 90 e seu uso intensificado nos últimos 10 anos (Vidal *et al.*, 2012). Hoje o Brasil é um dos maiores países produtores e exportadores de rochas ornamentais do mundo, com uma produção de 9,0 milhões de toneladas, sendo que 2,20 milhões de toneladas foram exportadas, gerando um faturamento de US\$ 1 bilhão (Chiodi Filho, 2012).

O fio diamantado é a tecnologia de corte de rocha ornamental mais difundida no mundo atualmente. No Brasil essa tecnologia teve seu desenvolvimento embasado no empirismo, sem muito suporte científico. Com base nesse aspecto, viu-se a necessidade de realizar um estudo acadêmico atualizado, embasado tanto na teoria quanto na prática junto às empresas, sobre a utilização do fio diamantado na extração de granitos comerciais no País.

2. OBJETIVO

Estudar a utilização da tecnologia de corte com fio diamantado na lavra de granitos comerciais, realizando um estudo de campo junto a empresas sobre o equipamento de corte, os cortes realizados, as rochas cortadas e parâmetros envolvidos no processo.

3. METODOLOGIA

O estudo contemplou um levantamento bibliográfico sobre a utilização do fio diamantado na lavra de rochas ornamentais, a fim de se obter um referencial teórico sobre o processo de extração com a utilização desta tecnologia. Com a finalidade de se obter um conhecimento prático da utilização do fio diamantado, foi realizado um estágio de 40 horas, durante o período de uma semana, na Empresa Alvorada Mineração, Comércio e Exportação Ltda., em Caraí, MG, e visitas a outras cinco pedreiras, de empresas colaboradoras. Com o estágio e as visitas foi possível o desenvolvimento de trabalhos práticos, através do acompanhamento do ciclo operacional, para os cortes realizados com esta tecnologia.



Figura 1 - Medições do desgaste do fio.

A fim de quantificar os parâmetros de vida útil do fio diamantado ($m^2.m^{-1}$) e sua produtividade ($m^2.h^{-1}$), durante o desenvolvimento dos cortes foram realizadas, respectivamente, medições de desgaste nas pérolas diamantadas e avanço do equipamento de corte sobre o trilho (Figura 1). As pérolas foram medidas em intervalos de 2,0 m, antes e depois de sua utilização no corte. Devido à necessidade de mais dados, foram coletadas

informações que constavam em planilhas das empresas visitadas. Foram coletados dados referentes a cinco tipos de rochas e lançados em planilhas para análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais tecnologias de corte utilizadas na lavra de granitos comerciais, para o isolamento de volumes secundários de rocha são fio diamantado, argamassa expansiva, explosivos e, cada vez menos, cunhas manuais, esta última sendo utilizadas principalmente nos esquadrejamento de blocos. No entanto, devido a suas vantagens econômicas e operacionais, o fio diamantado é o mais utilizado. Na Tabela I podemos observar o comparativo econômico e de produção entre o fio diamantado, a argamassa expansiva e o explosivo.

Tabela I - Comparativo econômico e de produção entre tecnologias de corte (Pinheiro, 2012).

	Fio Diamantado	Argamassa	Explosivo
Custo (R\$/m ²)	18,99	25,31	22,88
Prod. Corte (m ² /h)	7,50	1,33	1,33
Produção (m ³ /h)	2,8	0,67	0,67

O princípio básico de corte com fio diamantado é a translação deste, sob tensão, quando enlaçado na rocha. Para isso, primeiramente, são efetuados furos coplanares e perpendiculares que se interceptam nas extremidades. Em seguida o fio diamantado é inserido dentro destes furos, as duas pontas são emendadas, formando um circuito fechado, e colocado sobre a polia motriz do equipamento de corte. O corte se processa com o movimento de translação do fio, tensionado, em contato com a rocha. Durante o corte é fornecida água ao sulco de corte, com a finalidade de refrigeração e limpeza das partículas provenientes do corte.

O fio diamantado para o corte de granito é um cabo de aço flexível de aproximadamente 5,00 mm de diâmetro, que serve de suporte para anéis diamantados, conhecidos como pérolas. As pérolas consistem em um anel metálico de aproximadamente 7,00 mm que serve de suporte para a pasta diamantada, composta pelos diamantes (elemento abrasivo que realiza o corte da rocha) e pela liga metálica que os mantêm fixos. Seu diâmetro externo médio é de 11,40 mm. As pérolas são separadas regularmente entre si por um revestimento de borracha galvanizada, obedecendo a uma quantidade de 39 a 43 pérolas por metro de fio, sendo o fio de 40 pérolas por metro o mais utilizado.

A máquina de fio diamantado (equipamento de corte) consiste em uma plataforma motorizada com uma polia motriz ligada ao motor principal, com potência variando de 30 CV a 100 CV. A polia motriz, também conhecida como volante, tem a função de transladar o fio diamantado em contato com a rocha, com uma velocidade periférica que pode chegar a 40 m.s⁻¹, no entanto usualmente é utilizada no setor, velocidades periféricas numa faixa de 28 a 36 m.s⁻¹. O equipamento de corte, também possui um motor secundário, efetua o tensionamento contínuo do fio, com o movimento de recuo da máquina, à medida que avança o corte.

O fio diamantado pode ser utilizado em todas as fases do desmonte de rochas, seja ele primário ou secundário, e no esquadrejamento de blocos. O desmonte primário consiste no isolamento de grandes porções de rochas do maciço, conhecidos como quadrotos. Os quadrotos são divididos em filões, o que configura o corte secundário. Uma vez tombados, os filões são denominados de pranchas, que serão subdivididas em blocos de tamanho comercial (esquadrejamento), na Figura 2 é mostrado o esquadrejamento dos blocos. A utilização do fio é mais destacada nas etapas de desmonte primário e secundário. A aplicação do fio no esquadrejamento de blocos muitas vezes não é viável, pois seu emprego não permite um esquadrejamento seletivo, ou seja, a seleção de blocos sem defeitos do ponto de vista comercial, preferindo-se outras técnicas (Pinheiro, 2012).



Figura 2 - Prancha sendo esquadrejada em blocos com a utilização de explosivos.

Os dois principais tipos de corte realizados com o fio diamantado são os cortes verticais e horizontais (Figura 3), embora possam se realizar também cortes inclinados.

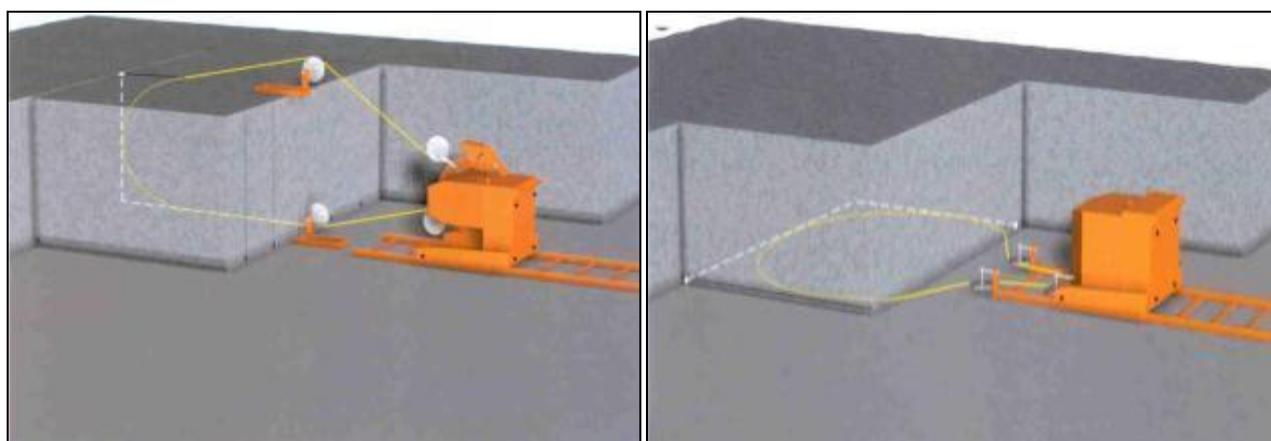


Figura 3 - Representação do corte horizontal e vertical, respectivamente. (Marini Quarrie Group, 2005 *apud* Regadas, 2006).

Conciliando a versatilidade e flexibilidade do fio diamantado com a montagem de um sistema estratégico de polias auxiliares, podem-se gerar variações destes dois tipos de corte, conforme necessidades, como são os casos dos cortes em “L”, os cortes verticais ascendentes e o corte cego (Figura 4).

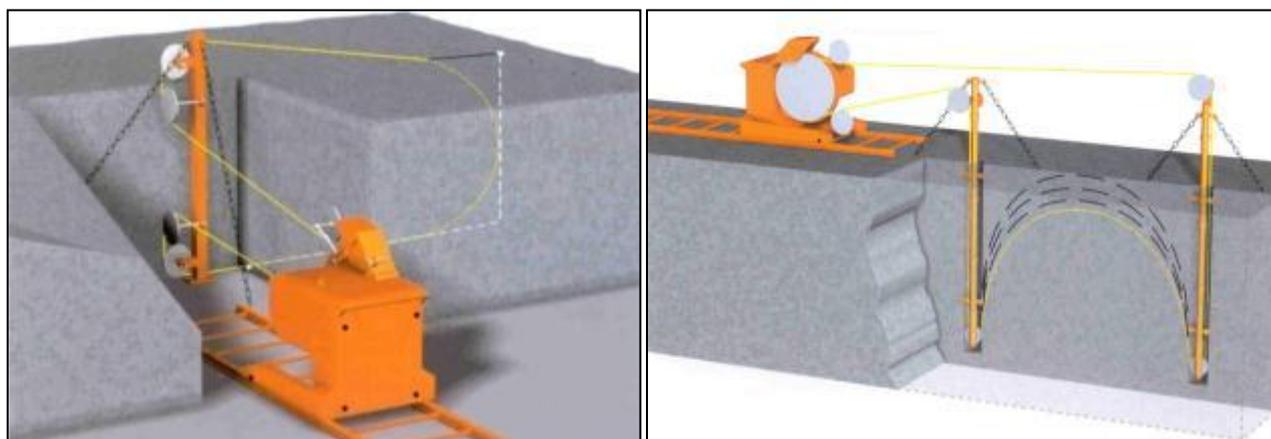


Figura 4 - Corte vertical em “L” e corte cego, respectivamente. (Marini Quarrie Group, 2005 *apud* Regadas, 2006).

O desempenho do fio diamantado é avaliado pelo seu rendimento e pela velocidade de corte. O rendimento expressa a vida útil do fio diamantado, sendo explicitado pelo total de área de rocha cortada por metro de fio ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$). Para um maior controle de desempenho do fio diamantado, o desgaste das pérolas é avaliado após a realização de cada corte, quantificado pela diferença de diâmetro das pérolas, antes e após o término do corte. O desgaste do fio diamantado não é linear, como é observado na Figura 5. O mecanismo de desgaste das pérolas consiste no desbaste gradual da matriz metálica, que suporta os diamantes, para que estes aflorem e se tornem afiados, com poder de corte. À medida que cada grão de diamante é consumido, novos grãos surgirão com o desgaste da matriz metálica, estabelecendo-se um ciclo, para o consumo das múltiplas camadas de diamante. Para se calcular o rendimento do fio diamantado, utiliza-se a Equação 1.

$$R = \left(\frac{\phi_n^2 - \phi_a^2}{\phi_i^2 - \phi_f^2} \right) \frac{A}{L} \quad (1)$$

Sendo, R = Rendimento (m^2/m);

ϕ_n = Diâmetro da pérola nova (mm);

ϕ_a = Diâmetro do anel de suporte (mm);

ϕ_i = Diâmetro da pérola no início do corte (mm);

ϕ_f = Diâmetro da pérola no fim do corte (mm);

A= Área de rocha cortada (m^2);

L= Comprimento do fio (m).

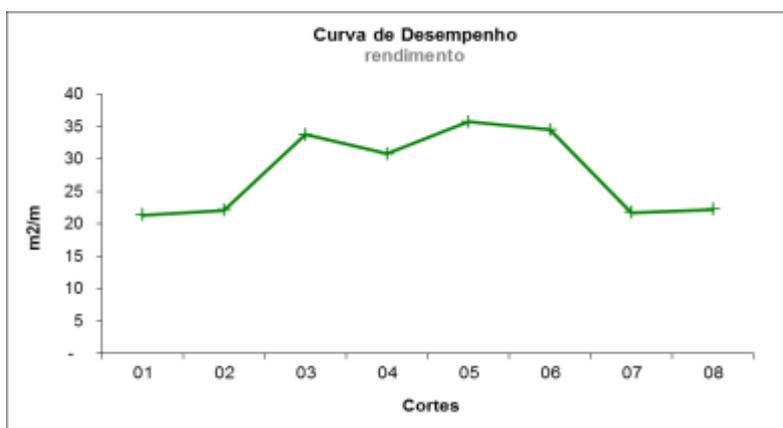


Figura 5 - Curva representando o rendimento de um fio diamantado ao longo de sua vida útil.

A velocidade de corte é a razão entre a área de rocha cortada pelo tempo gasto para a realização do corte ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), e depende de diversos parâmetros, sendo o principal o tipo de rocha a ser cortada. Vale ressaltar, que a velocidade de corte não é constante ao longo de todo o corte e está condicionada ao comprimento de fio em contato com a rocha (dimensão de arrasto) e ao grau de anisotropia do maciço (Caranassios; Pinheiro, 2003).

O corte com o fio diamantado é afetado por parâmetros controláveis e não controláveis. Os parâmetros não controláveis são relativos a características das rochas. Os parâmetros controláveis são de âmbito operacional, como: o raio de curvatura do fio (ideal que o fio tenha forma de semicircunferência ou segmento de circunferência), potência da máquina, velocidade periférica e de arrasto do fio, quantidade de água no corte e dimensões do corte. Na Tabela II observa-se os diversos parâmetros que afetam a eficiência do corte com fio diamantado.

Tabela II - Fatores que afetam a eficiência do corte com o fio diamantado (modificado de Özçelik, 1999 *apud* Ataei *et al*, 2011).

Parâmetros não controlados relacionados à característica das rochas	Parâmetros parcialmente controlados ou controlados	
	Propriedades da ferramenta de corte e equipamentos	Condições de trabalho
Dureza	Potência da máquina	Pessoal qualificado
Abrasividade	Velocidade periférica	Vibrações da máquina
Tensões	Números de pérolas por metro	
Grau de alteração	Número de pérolas em contato com a rocha	
Descontinuidades	Raio de curvatura do fio em contato com a rocha	
Propriedades mineralógicas	Quantidade de água usada	
Características texturais	Velocidade de arrasto	
	Dimensões do corte	

Para análise dos dados foi feita uma correlação entre os valores de rendimento obtidos com a dimensão da área cortada e com a dimensão de arrasto. Na Figura 6 podemos observar esta correlação para dois tipos de rochas. Mesmo com uma dispersão dos dados relativamente grande (Rocha 1 apresentando $R^2 = 0,3315$ e Rocha 2 apresentando $R^2 = 0,5649$), pode-se verificar uma tendência de aumento de rendimento do fio diamantado com o aumento da área de corte uma possível explicação para isso é que os desgastes das pérolas ocorrem mais acentuadamente na fase inicial, quando o bloco de rocha sendo cortado apresenta arestas afiadas, e na fase final do corte, quando o fio vai perdendo o formato de semicircunferência e o raio de curvatura é diminuído, o que gera maiores esforços nas pérolas, conseqüentemente maior desgaste. Isto indicar que corte de áreas maiores diminui a quantidade de cortes necessários, reduzindo as etapas de menor rendimento.

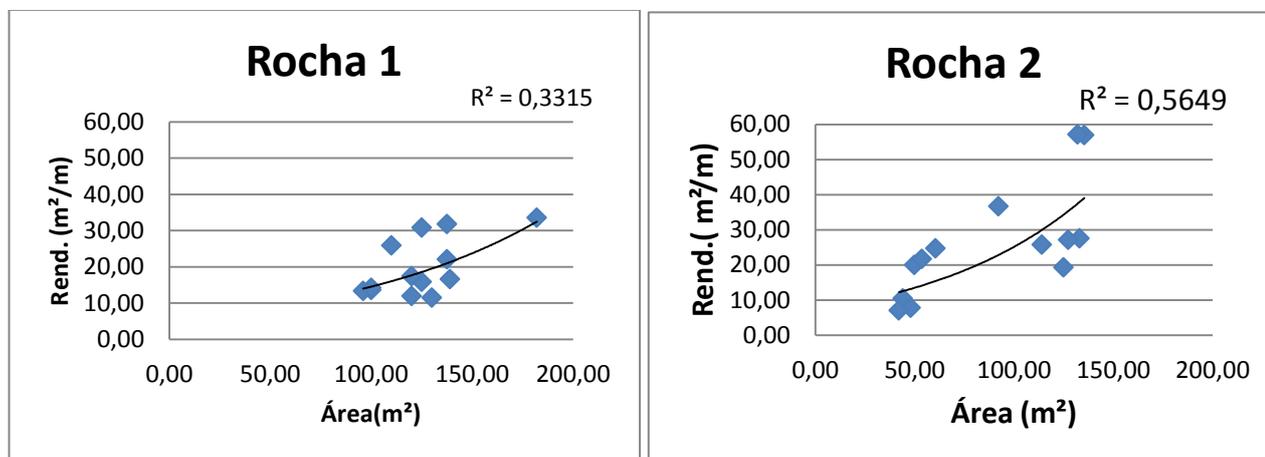


Figura 6 - Curvas de correlação entre rendimento e área de rocha cortada.

Outro ponto observado com a análise dos resultados foi à tendência de aumento do rendimento com o aumento da dimensão de arrasto do fio, que também apresentou uma dispersão de dados relativamente alta como podemos observar na Figura 7 (Rocha 1 e Rocha 2 apresentaram $R^2=0,4608$ e $R^2 = 0,5048$, respectivamente). A tendência de maior rendimento com aumento da dimensão de arrasto contradiz à lógica, já que quanto menor a dimensão de arrasto menor o número de pérolas em contato com a rocha, aumentando-se a potência disponível para cada uma delas. Com isso, pode-se aumentar a velocidade periférica e a velocidade de arrasto, o que geraria, na teoria, uma situação de atrito ideal, que permitiria a correta afiação das pérolas e o aumento do rendimento.

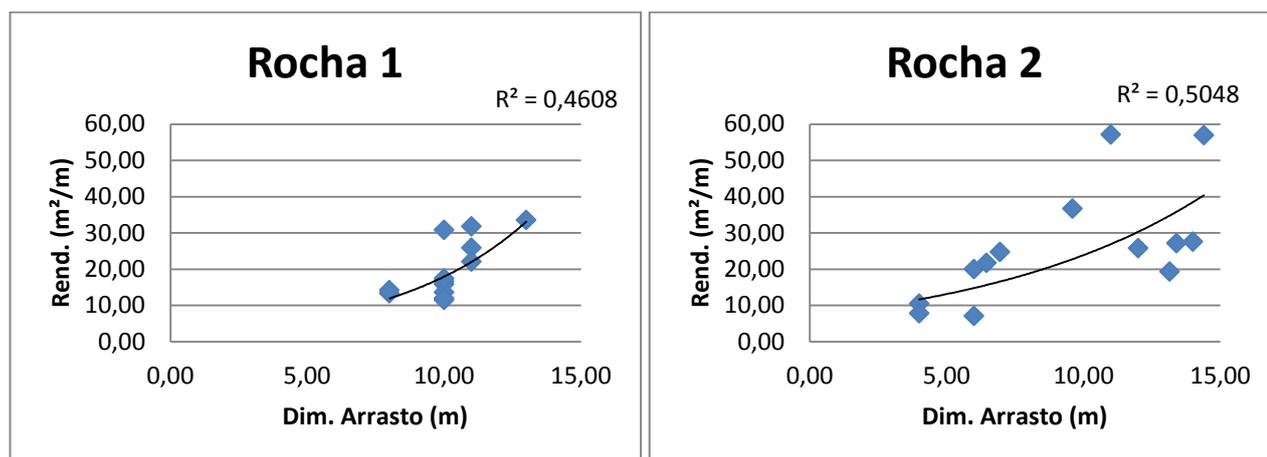


Figura 7 - Curvas de correlação entre rendimento e dimensão de arrasto.

Por outro lado, analisaram-se os rendimentos para cortes horizontais e verticais, com o intuito de verificar a relação entre o desempenho do fio e o tipo de corte. No entanto, não foi verificada uma diferença padrão entre eles, como podemos observar na Tabela III.

Tabela III - Correlação entre o desempenho do fio diamantado e o tipo de corte realizado.

Rocha	Corte	Rendimento (m ² /m)	Desvio Padrão	Velocidade de corte(m ² /h)	Desvio Padrão
1	Horizontal	21,64	13,95	6,37	1,72
	Vertical	20,67	9,48	8,29	2,22
2	Horizontal	19,32	5,43	6,80	1,21
	Vertical	26,35	16,00	7,80	2,77
3	Horizontal	14,72	8,72	12,79	3,10
	Vertical	21,04	16,19	12,11	2,56
4	Horizontal	23,15	11,42	11,48	1,11
	Vertical	19,90	8,01	14,49	3,52
5	Horizontal	26,5	12,67	8,90	1,72
	Vertical	24,66	4,88	8,67	2,25

O rendimento nas rochas 1, 4 e 5 apresentaram maiores rendimentos nos corte horizontais. Já as rochas 2 e 3 obtiveram maiores rendimentos nos cortes verticais.

Quanto à velocidade de corte, as rochas 1,2 e 4 apresentaram menores velocidades nos cortes horizontais, enquanto as rochas 3 e 5 obtiveram menores velocidades no cortes verticais. Todavia, é frequente ouvir relatos de profissionais da área, que os cortes horizontais apresentam maiores tempo de corte, ou seja, menor velocidade. Isso pode ser devido ao acúmulo de água e lama proveniente da refrigeração e retirada das partículas do sulco de corte, nos cortes horizontais, o que não acontece com os cortes verticais, que tem a água retirada do sulco de corte pela gravidade. Isso gera um maior esforço do motor principal da máquina (aumento da amperagem), para a manutenção da velocidade periférica do fio, devido à resistência da água. O acúmulo de água no corte horizontal também contribui para a diminuição do poder de corte das pérolas, já que gera o fenômeno da aquaplanagem.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Engenheiros de Minas José Roberto Pinheiro e Núria Fernández Castro pela dedicação e tempo disponibilizado. Ao Núcleo Regional do Centro de Tecnologia Mineral no Espírito Santo, às empresas colaboradoras, a Poliana de Oliveira Marcarini pelo apoio e ao CNPq pela bolsa concedida.

6. REFERÊNCIAS

Ataei, M; Mikaiel, R; Sereshki, F; Ghaysari, N. 2011. Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis, Arabian Journal of Geosciences, Springer Berlin /Heidelberg, ISSN: 1866-7511, Earth and Environmental Science, p 1-7. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-010-0278-z>.

Caranassios, A.; Pinheiro, J.R. 2003. O emprego do fio diamantado na extração de rochas ornamentais: curso básico para operadores. Cachoeiro de Itapemirim.CETEMAG. 25pag.

Chiodi Filho, Cid. 2012. Balanço das Exportações e Importações de Rochas e de Revestimento no 1º Bimestre de 2012. São Paulo: ABIROCHAS, 7p. (Informe n. 04/2012).

Qualhano, Miguel Ângelo Lima. 2005. O arranjo produtivo local do setor de rochas ornamentais no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Cândido Mendes, Campos Dos Goytacazes – RJ.

Pinheiro, José Roberto. 2012.Comunicação Pessoal Pedreira da Empresa Alvorada Mineração Comércio e Exportação Ltda, Caraiá, MG.

Regadas, I. C. M. C. 2006. Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. USP. 128p.

Vidal, F.W.H; Pinheiro, J.R; Castro, N.F; Caranassios, A (*in memoriam*). 2012. Lavra de rochas ornamentais. In: Tecnologia de Rochas Ornamentais. VIDAL, *et al.* (Org.).Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, [no prelo].