

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**PROCESSAMENTO DO ARENITO POR FRESAMENTO CNC, A PARTIR DA  
DIGITALIZAÇÃO 3D, PARA PRODUÇÃO DE RÉPLICAS DE OBJETOS DO  
PATRIMÔNIO CULTURAL**

João Rogério Machado Pereira

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2019

João Rogério Machado Pereira

**PROCESSAMENTO DO ARENITO POR FRESAMENTO CNC, A PARTIR DA  
DIGITALIZAÇÃO 3D, PARA PRODUÇÃO DE RÉPLICAS DE OBJETOS DO  
PATRIMÔNIO CULTURAL**

Trabalho desenvolvido no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior

COORIENTADOR: Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva - PGDesign

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Cezar Zingano

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGE3M (DEMIN)

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – DEMEC

Dr. Gustavo Freitas

Tecnodrill Indústria de Máquinas Ltda.

Dedico esta Tese à minha esposa  
Maria Theresinha de Oliveira Pereira,  
a maior incentivadora deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por permitir a um menino de família humilde atingir tão alto grau do conhecimento. Em segundo lugar agradeço a minha família pelo apoio recebido nos momentos difíceis.

Também foram tantas outras pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho que fica difícil citar o nome de todas. Algumas pessoas tiveram participação especial, e estas eu não poderia deixar de citar. Começo agradecendo o Prof. Dr. Vinícius Karlinski de Barcelos – Lafun UFRGS que foi meu contato inicial neste laboratório com o Prof. Dr. Jaime Alvares Spim (falecido), que foi meu primeiro orientador de doutorado no Lafun UFRGS a quem muito agradeço por acreditar no meu potencial me inserindo no seu grupo de pesquisa como orientando de doutorado. Na sequência, agradeço o Prof. Dr. Wilson Kindlein Junior, meu orientador deste trabalho que, após o falecimento do Prof. Spim, acreditou na minha capacidade e se propôs a me orientar num novo projeto de doutorado e sempre esteve muito presente orientando e dissipando dúvidas com relação a este trabalho. Também, sempre muito presente e dedicado foi o Prof. Dr. Fábio Pinto da Silva, meu co-orientador a quem muito agradeço pela dedicação na orientação e pelos conhecimentos transmitidos.

Além dos orientadores também quero agradecer o Prof. Dr. André Cezar Zingano do Laboratório de Mecânica de Rochas da UFRGS que, além de participar da minha banca de Qualificação de Doutorado com contribuições importantes também muito contribuiu com a disponibilidade do Laboratório de Mecânica de Rochas para ensaios físicos e mecânicos do material da minha pesquisa. Agradeço também o Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem – Labogem UFRGS por sua contribuição e auxílio nos ensaios geológicos da rocha estudada e na interpretação dos resultados. Também agradeço ao Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann e a Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Annelise Kopp Alves – Lacer UFRGS pela disponibilização deste laboratório para realização dos ensaios do material estudado. Registro também meus agradecimentos ao Dr. Eng. Lucas Bonan Gomes e ao Prof. M.e Edgar Bercht do Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de geociências da UFRGS pela contribuição com os ensaios do material pesquisado e a interpretação dos resultados. Ainda de grande importância foram os auxílios prestados pelos colegas do CME na

metalização de materiais para a pesquisa, aos quais presto meus agradecimentos. Não poderia também deixar de agradecer o Prof. Dr. Rodrigo Rossi – PROMEC UFRGS, pelo empréstimo de uma câmera de alta velocidade de captura, a qual foi muito importante na obtenção de dados para esta pesquisa. Ainda deixo meus agradecimentos para o bolsista Maurício Zucchetti do Laboratório de Mecânica de Rochas pelo grande auxílio nos ensaios físicos e mecânicos do material pesquisado. Um agradecimento especial faço a todos os colegas e professores do LdSM pela companhia, pela colaboração e coleguismo durante todo o tempo que convivi neste laboratório em meu trabalho de pesquisa. Destaco neste laboratório o colega doutorando Gabriel Barbieri ao qual agradeço muito pelo auxílio na diagramação e no tratamento da parte gráfica deste trabalho. Agradeço ainda ao Sr. Dorival da Silva, proprietário da pedreira que forneceu o material para a pesquisa sem custo e ao geólogo Luís Fernandes Bernardes pelas informações técnicas da lavra.

No que se refere a Instituições agradeço a UFRGS pela oportunidade de poder contar com esta instituição de reconhecimento internacional para realização do meu doutorado. Também agradeço ao IFRS por me conceder o afastamento em tempo integral para esta capacitação. Ainda agradeço a Capes pelo auxílio com a bolsa do programa Pró-Doutoral.

Para finalizar deixo meus agradecimentos a todas instituições e pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O arenito é um material milenar e está presente em esculturas, monumentos, fachadas de prédios históricos e em muitos outros objetos de importância histórica e cultural. Preservar este patrimônio não é uma tarefa fácil, pois não consiste apenas em proteger de intempéries ou de atos de vandalismo. É preciso muito mais. É necessário deter tecnologia capaz de restaurá-lo e reconstruí-lo. Neste sentido, este trabalho apresenta uma tecnologia capaz de produzir réplicas fidedignas de objetos do patrimônio cultural, em arenito, a partir da digitalização tridimensional e do processamento por usinagem CNC (comando numérico computadorizado). Esta tecnologia, além de permitir produzir réplicas, oferece também a possibilidade de produzir objetos de formas geométricas variadas, a partir da usinagem de arenito. A metodologia utilizada consistiu, primeiramente, a partir de dados da revisão bibliográfica, fazer alguns ensaios preliminares de usinagem para avaliação da viabilidade do método. Posteriormente, adquiriu-se material de fonte conhecida, o qual foi caracterizado por meio de ensaios físicos e mecânicos e utilizou-se uma fresadora CNC na qual se fez ensaios utilizando-se ferramentas de metal duro e de diamante. Utilizando usinagem CNC através das tecnologias CAM (manufatura assistida por computador) e Digitalização Tridimensional bem como os conhecimentos obtidos em ensaios preliminares, produziram-se réplicas das inscrições rupestres da Pedra Grande, da cidade de São Pedro do Sul, que é o maior monumento petroglífico do Estado do Rio Grande do Sul, constituído de arenito. O estudo compreendeu também seleção de ferramentas adequadas à usinagem do arenito (diamantadas), estratégias de usinagem, parâmetros de corte para fresamento CNC e análise de vida das ferramentas utilizadas. Utilizando-se uma câmera com alta velocidade de captura gravaram-se imagens do processo de corte do arenito, as quais foram utilizadas para estudo do processo de corte e formação do cavaco. Também foi feita uma análise do erro dimensional da geometria da réplica produzida, comparada com a obra original, utilizando-se softwares para processamento 3D (tridimensional). Os resultados permitiram concluir que a metodologia utilizada proporcionou a produção de réplicas com desvios máximos da ordem de 1,2 mm, comparados com a obra original, mas que com a utilização de fresa de PCD de ponta esférica com diâmetro menor que 6 mm é possível diminuir estes desvios. Considerando-se que os grãos de areia que formam

o arenito estudado apresentam valores entre 0,1 e 2 mm, estes desvios são perfeitamente aceitáveis para este caso. Indica-se, caso seja necessário usinar arenito, iniciar utilizando ferramentas de PCD, com velocidade de corte próxima de 600 m/min (15000 rpm para ferramenta com 12 mm de diâmetro), profundidade de corte de 1 a 2 mm, velocidade de avanço 400 a 1000 mm/min, e penetração de trabalho de 50% do diâmetro da ferramenta.

Palavras Chaves: Arenito, Digitalização Tridimensional, Usinagem CNC, Produção de Réplicas, Pedra Grande.

## ABSTRACT

The sandstone is a millennial material and is present in sculptures, monuments, facades of historic buildings and many other objects of historical and cultural importance. Preserving this heritage is not an easy task, for it does not consist merely of protecting from weather or acts of vandalism. It takes much more. It is necessary to detain technology capable of restoring and rebuilding it. In this sense, this work presents a technology capable of producing trustworthy replicas of cultural heritage objects in sandstone, from three-dimensional digitization and CNC (computer numerical command) processing. This technology, besides allowing replica production, also offers the possibility of producing objects of varied geometric forms, from the machining of sandstone. Firstly, the methodology used consisted of doing some preliminary machining tests to evaluate the feasibility of the method, using data from the literature review. Secondly, it was necessary to acquire material of known source, which was characterized by means of physical and mechanical tests and a CNC milling machine was used in which tests were carried out using carbide and diamond tools. Utilizing CNC machining through CAM (Computer Assisted Manufacturing) and Three-Dimensional Digitizing technologies as well as knowledge in preliminary tests, replicas of the rupestrian engravings of Pedra Grande were made. Pedra Grande is considered the largest petroglyphic monument made of sandstone in Rio Grande do Sul. The study also included selection of suitable tools for sandstone (diamond) machining, machining strategies, cutting parameters for CNC milling and life analysis of the tools used. A high-speed camera was used to record the sandstone cutting process, and the images were used to study the cutting process and chip formation. An analysis of the dimensional error of the produced replica geometry was also made and then compared to the original piece, using software for 3D (three-dimensional) processing. The results lead to conclude that the methodology that was used allowed the production of replicas with maximum deviations of the order of 1,2 mm, compared to the original work, but that the use of a spherical tip PCD cutter with diameter of less than 6 mm it is possible to reduce these deviations. Considering that the grains of sand that form the sandstone studied in this work present values between 0,1 and 2 mm, these deviations are perfectly acceptable in this case. If the milling of sandstone is necessary, it is recommended to start using PCD tools, with cutting speed about 600 m/min (15000 rpm for 12 mm



diameter tool), cutting depth of 1 to 2 mm, feed rate 400 to 1000 mm/min, and work penetration of 50% of the tool diameter.

Keywords: Sandstone, Three-Dimensional Scanning, CNC Machining, Replica Production, Pedra Grande.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	XIII
Lista de Quadros.....	XX
Lista de Tabelas.....	XXI
Lista de Símbolos e Siglas.....	XXIII
1 Introdução.....	25
1.1 Objetivos.....	26
2 Revisão Bibliográfica.....	28
2.1 Arenito.....	28
2.1.1 Classificação dos Arenitos.....	31
2.1.2 Fatores Determinantes das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Arenitos.....	34
2.1.3 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Arenitos.....	46
2.2 Usinagem / Fresamento.....	48
2.3 Digitalização 3D.....	79
2.4 Abrigo da Pedra Grande.....	83
3 Materiais e Métodos.....	89
3.1 Ensaio preliminares.....	90
3.2 Coletas e Caracterização de Material.....	94
3.2.1 Visitas às pedreiras e coleta de material.....	94
3.3 Ensaio de usinagem com a utilização de novas ferramentas.....	98
3.3.1 Ferramentas ensaiadas.....	98

3.3.1.1 Ferramentas de diamantes impregnados em matriz metálica ligante (geometria não definida) .....	99
3.3.1.2 Ferramentas diamantadas por eletrodeposição (geometria não definida) ..	100
3.3.1.3 Ferramentas de diamante policristalino – PCD (geometria definida) .....	101
3.3.1.4 Ferramentas de Metal Duro (geometria definida) .....	103
3.3.2 Ensaio para avaliar desgaste de ferramentas, rugosidades e granulometria dos cavacos gerados .....	104
3.3.2.1 Avaliação do desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem dos rasgos. ....	105
3.3.2.2 Avaliação das rugosidades das superfícies usinadas .....	106
3.3.2.3 Avaliação da granulometria do cavaco gerado por cada ferramenta .....	107
3.3.3 Análise do corte e geração de cavacos com câmera de alta velocidade .....	107
3.3.4 Medição das temperaturas na usinagem do arenito .....	108
3.3.5 Ensaio de vida das ferramentas selecionadas .....	110
3.4 Escolha do motivo para usinar .....	112
3.4.1 Obtenção do Modelo 3D .....	112
3.4.2 Usinagem de Protótipo em MDF .....	114
3.4.4 Avaliação da geometria e das dimensões das réplicas .....	118
3.4.5 Avaliação do desgaste das ferramentas de PCD utilizadas na usinagem da réplica em arenito .....	118
4 Resultados e discussão .....	120
4.1 Avaliação dos ensaios preliminares .....	120
4.2 Caracterização do arenito .....	122

4.2.1 Petrografia da Rocha.....	122
4.2.2 Análise por Difração de Raios X.....	124
4.2.3 Análise por Fluorescência de Raios X.....	125
4.2.4 Ensaios Físicos e Mecânicos .....	125
4.3 Ensaios de usinagem para definição dos parâmetros de corte .....	127
4.3.1 Avaliação do desgaste das ferramentas.....	127
4.3.2 Avaliação das rugosidades.....	130
4.3.3 Avaliação da granulometria dos cavacos gerados por cada ferramenta .....	132
4.4 Análise do corte e geração de cavacos.....	133
4.5 Avaliação de temperaturas.....	141
4.6 Resultados dos ensaios de vida das ferramentas .....	142
4.7 Usinagem dos mosaicos réplicas da pedra grande em arenito .....	146
4.8 Análise do desgaste das ferramentas na usinagem da réplica da Pedra Grande. .....	153
5 Conclusões.....	161
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	163
6 Referências Bibliográficas .....	165
Apêndice A – Ensaios físicos e mecânicos .....	174
Apêndice B – Ensaios de abrasividade CERCHAR .....	204

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 01 - Componentes de uma rocha sedimentar .....	30
Figura 02 - Mineralogia dos principais tipos de arenito e origem .....	33
Figura 03 - Grau de esfericidade e arredondamento.....	39
Figura 04 – Grau de seleção de uma rocha sedimentar .....	40
Figura 06 - Arenito com estratificação cruzada em um arenito originado num ambiente desértico, fotografado no Parque Nacional Zion, no sudoeste de Utah, USA .....	43
Figura 07 - Fluxograma da determinação da maturidade textural das rochas sedimentares siliciclásticas .....	44
Figura 08 - Parâmetros de usinagem no fresamento: velocidade de rotação ( $n$ ), velocidade de avanço ( $V_f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e penetração de trabalho ( $a_e$ ) .....	49
Figura 09 - Fresamento concordante (A) e discordante (B) .....	50
Figura 10 - Fresas de topo de ponta esférica (A) e ponta reta (B) .....	51
Figura 12 - Vista esquemática de uma ferramenta de composto de diamante embebido em matriz metálica ligante .....	57
Figura 13 - Broca para furação de mármore e granito de 10 mm de diâmetro de composto de diamante embebido em matriz metálica ligante, utilizada neste trabalho .....	57
Figura 14 - Vista esquemática de uma ferramenta diamantada por eletrodeposição	58
Figura 15 - Ferramenta diamantada por eletrodeposição de 10 mm de diâmetro Master Diamond PMD100/D126, utilizada neste trabalho .....	58
Figura 16 - Tipos de ferramentas usadas para cortar rochas.....	59

Figura 17 - Formação de cavaco em forma de cunha através da propagação de trincas com a utilização de dois pares de indentadores .....	60
Figura 18 - Sistema de corte combinando indetadores duplos com ferramenta tipo cunha de arraste (Drag Pik) .....	60
Figura 19 - Centro de Usinagem Breton de 5 eixos em operação de desbaste utilizando serra de disco como ferramenta de corte .....	63
Figura 20 - Centro de Usinagem Breton de cinco eixos em operação de acabamento utilizando fresa .....	64
Figura 21 - Esquema de seqüência de operações de usinagem de rochas num centro de usinagem de seis eixos utilizando serra de disco como ferramenta de usinagem.....	65
Figura 22 - Peça usinada .....	65
Figura 23 - Interação mecânica entre ferramenta e rocha durante a operação de corte por serra de disco diamantada .....	67
Figura 24 - Representação esquemática da região de corte de uma serra de disco diamantada mostrando a formação de cauda de matriz .....	68
Figura 25 – Representação esquemática dos diferentes cavacos formados durante o processo de corte da rocha com ferramenta de geometria definida.....	70
Figura 26 – Variação da força de corte em função do ângulo $\gamma$ da ferramenta .....	71
Figura 27 - Ferramenta com ângulo $\gamma$ positivo (A) e negativo (B) .....	73
Figura 28 - Imagens da câmara de alta velocidade na usinagem do Arenito de Posta .....	75
Figura 29 - Broca tubular com insertos intercambiáveis de PCD .....	76
Figura 30 - Figura humana usinada em opala sobre ágata.....	77

Figura 31 - Fresas usadas por Tessmann no ensaio de usinagem do objeto da figura 31 .....	77
Figura 32 - Padrão geométrico utilizado por Etchepare .....	78
Figura 33 – Princípio da digitalização 3D por triangulação .....	81
Figura 34 – Funcionamento esquemático do digitalizador por Holografia Conoscópica.....	82
Figura 35 – Abrigo da Pedra Grande .....	83
Figura 36 - Localização do município de São Pedro do Sul – RS.....	84
Figura 37 - Petróglifos estilo A .....	85
Figura 38 - Petróglifos estilo B .....	86
Figura 39 - Petróglifos estilo C .....	86
Figura 40 - Digitalização 3D da Pedra grande, câmera fotográfica e scanner 3D Vivid 9i .....	87
Figura 41 – Malha tridimensional de triângulos de parte da área digitalizada (3 x 1,5 m).....	88
Figura 42 - Ensaios preliminares de usinagem do arenito em fresadora convencional .....	90
Figura 43 - Ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares .....	91
Figura 44 - Resultado dos primeiros ensaios de usinagem do arenito.....	91
Figura 45 – Estela egípcia.....	92
Figura 46 - Ferramentas utilizadas na usinagem da Estela Egípcia em arenito.....	94
Figura 47 - Localização da pedreira Dorival em São Sebastião do Caí .....	95
Figura 48 - Pedreira de arenito em atividade, em São Sebastião do Caí.....	95

Figura 49 - Preparação de Broca Diamantada Diamax de 10 mm de diâmetro para ser usada como fresa .....	99
Figura 50 - Imagem de Broca Diamax 10 mm usada, em MEV .....	100
Figura 51 - Imagem da área de corte da ferramenta diamantada por eletrodeposição de 10 mm de diâmetro (fig. 15, pág. 58) mostrando os grãos de diamante .....	101
Figura 52 - Fresa de PCD Wirutex de 6 mm de diâmetro com ponta esférica .....	101
Figura 53 - Fresa de PCD Wirutex de 10 mm de diâmetro com ponta esférica (dois cortes) .....	102
Figura 54 - Inserto intercambiável (pastilha) de PCD Sandvik .....	102
Figura 55 - Fresa Sandvik de 12 mm de diâmetro com inserto intercambiável de PCD .....	102
Figura 56 - Inserto intercambiável (pastilha) de Metal Duro utilizado na fresa de 12 mm de diâmetro .....	103
Figura 57 - Fresa inteira de metal duro de ponta esférica de 10 mm de diâmetro utilizada neste trabalho .....	103
Figura 58 - Imagem do bloco de arenito com a usinagem dos 5 rasgos e as ferramentas utilizadas na usinagem .....	105
Figura 59 - Medição de rugosidade com rugosímetro convencional com apalpador .....	106
Figura 60 – Câmera de alta velocidade obtendo imagens da usinagem do arenito	108
Figura 61 - Medição das temperaturas com termógrafo Testo 890-2.....	110
Figura 62 - Área digitalizada da Pedra Grande com a área de interesse destacada .....	113
Figura 63 - Área digitalizada da Pedra Grande escolhida para usinagem com a identificação dos mosaicos. Vista superior (A) e isométrica (B) .....	114



Figura 65 - Bloco de arenito coletado na pedreira e serrado nas dimensões externas .....	117
Figura 66 – Fresamento CNC do mosaico 4 em arenito .....	118
Figura 67 – Réplica usinada com 30% do tamanho natural, em Renshape® 460 (A) e em Arenito (B), comparação da réplica com a obra original, em Renshape® 460 (C) e em Arenito (D) .....	121
Figura 68 – Lâmina A, imagem da rocha ao microscópio petrográfico.....	122
Figura 69 – Lâmina B, detalhe da lâmina A .....	123
Figura 70 – Difratoograma de amostra do arenito estudado neste trabalho .....	124
Figura 71 - Imagens das ferramentas antes e depois do ensaio. A: Fresa inteira de Metal Duro, B: Pastilha de Metal Duro, C: Pastilha de PCD, D: Broca Diamantada, E: Ferramenta diamantada por eletrodeposição.....	128
Figura 72 – Imagens da superfície do arenito usinado.....	131
Figura 73 - Broca Diamantada, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo .....	134
Figura 74 - Pastilha de Metal Duro, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo .....	135
Figura 75 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo .....	136
Figura 76 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte concordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo .....	137

Figura 77 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 2.000 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 12.000 quadros por segundo .....	138
Figura 78 - Termografia durante o ensaio de usinagem de arenito .....	142
Figura 79 - Desgaste progressivo das Pastilhas de PCD e de Metal Duro no Ensaio de Vida .....	143
Figura 80 – Pastilha de PCD após remover 1120 cm <sup>3</sup> de arenito (9 horas e 20 minutos de trabalho), obtida por digitalização 3D. (A) Vista superior; (B) Vista em perspectiva isométrica.....	144
Figura 81 – Broca Diamantada nova e após remover 200, 400 e 720 cm <sup>3</sup> .....	144
Figura 82 – Broca Diamantada após fim da primeira vida (hora de sofrer afiação).145	
Figura 83 - Superfície do arenito após faceamento com broca diamantada, no final da vida útil, mostrando ondulações .....	145
Figura 84 – Broca Diamantada após afiação .....	146
Figura 85 - Bloco de arenito quadrado de 200 x 200 mm após faceamento .....	148
Figura 86 - Mosaico 4 após operação de desbaste.....	148
Figura 87 - Mosaico 4 após 1 <sup>a</sup> operação de acabamento .....	149
Figura 88 - Mosaico 4 após operação final de acabamento .....	149
Figura 89 - Imagem do mosaico 3 após operação final de acabamento .....	150
Figura 90 - Imagem do mosaico 2 após operação final de acabamento .....	150
Figura 91 - Imagem do mosaico 1 após operação final de acabamento .....	151
Figura 92 - Comparação dos mosaicos usinados com a versão original digitalizada .....	152
Figura 93 – Pastilha de PCD N <sup>o</sup> 1 .....	153

Figura 94 – Desgaste da Pastilha de PCD nº 1 após operações de faceamento e desbaste do mosaico 4 que removeu 684,7 cm <sup>3</sup> de arenito .....	154
Figura 95 – Pastilha de PCD Nº 2 .....	154
Figura 96 - Desgaste da Pastilha de PCD nº 2 após operações de faceamento e desbaste dos mosaicos 1, 2 e 3 que removeu 1408 cm <sup>3</sup> de arenito. ....	154
Figura 97 – Imagem do desgaste das pastilhas de PCD nº 1, 2 e 3. ....	155
Figura 98 - Desgaste da ferramenta de diamante PCD de ponta esférica com 10 mm de diâmetro após 1ª operação de acabamento dos mosaicos 1, 2, 3 e 4 que removeu 288 cm <sup>3</sup> de arenito.....	157
Figura 99 - Desgaste da ferramenta de PCD esférica de 10 mm de diâmetro. ....	158
Figura 100 - Desgaste da ferramenta de PCD de ponta esférica com 6 mm de diâmetro. ....	158
Figura 101 - Desgaste da ferramenta de diamante PCD de ponta esférica com 6 mm de diâmetro após operação final de acabamento dos mosaicos 1, 2, 3 e 4.....	159
Figura 102 – Resultado final da usinagem dos mosaicos. ....	160

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 01 - Classificação dos arenitos.....	33
Quadro 02 - Classificação química dos arenitos .....	35
Quadro 03 - Metodologia composta por quatro fases e suas respectivas etapas .....	89
Quadro 04 - Ferramentas adquiridas para os ensaios de usinagem de arenito .....	98
Quadro 05 – Especificações das ferramentas utilizadas nos ensaios de vida .....	111
Quadro 06 – Operações, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados na confecção do protótipo em MDF .....	115
Quadro 07 – Operações, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados na confecção da Réplica em Arenito.....	116
Quadro 08 - Operações, tempo gasto e volume removido.....	147
Quadro 09 - Volume de material removido por cada ferramenta, operações efetuadas, e mosaicos usinados .....	153
Quadro 10 – Desempenho das pastilhas de PCD e parâmetros de usinagem .....	155

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 01 - Composição química dos principais tipos de arenito.....	36
Tabela 02 - Classificação granulométrica de Wentworth e sua relação com a classificação Phi.....	38
Tabela 03 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização de rochas ornamentais .....	47
Tabela 04 - Especificações ASTM para mármore, calcários, travertinos, arenitos e quartzitos.....	47
Tabela 05 - Comparação da dureza do diamante com alguns materiais considerados duros .....	52
Tabela 06 - Orientações para aplicação das ferramentas diamantadas em função do tamanho dos grãos do diamante .....	54
Tabela 07 - Classificação do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI) .....	62
Tabela 08 - Recomendações de velocidades periféricas para máquinas de disco simples com refrigeração por água .....	69
Tabela 09 - Recomendações de velocidade periférica e taxa de avanço para brocas diamantadas refrigeradas com água .....	69
Tabela 10 - Parâmetros de usinagem utilizados na usinagem do objeto da figura 28 .....	78
Tabela 11 - Parâmetros utilizados para usinagem do padrão geométrico da figura 26 .....	79
Tabela 12 - Medições de rugosidades para avaliação do método .....	107
Tabela 13 – Parâmetros de usinagem utilizados nas medições de temperaturas ..	110
Tabela 14 - Parâmetros para ensaio de vida das ferramentas.....	112
Tabela 15 - Fases identificadas e aproximação semiquantitativa .....	124

Tabela 16 - Análise do ensaio de fluorescência de Raios X de uma amostra do arenito estudado.....	125
Tabela 17 - Resultados médios do Ensaio de Compressão Triaxial para cada litotipo e tensão confinante .....	126
Tabela 18 - Dados obtidos no Ensaio Triaxial pelo RockData .....	126
Tabela 19 - Propriedades físicas dos arenitos .....	127
Tabela 20 - Dados de desgaste das ferramentas ensaiadas .....	129
Tabela 21 - Resultados das médias das medições das rugosidades superficiais dos nove rasgos usinados, pelo método da digitalização a Laser (cutoff = 2,5 mm) .....	130
Tabela 22 - Resumo dos resultados dos ensaios de granulometria.....	133

**LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

AA	Absorção d'água
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
A.D.	Ano Domini, ano da era cristã ou depois de Cristo
$a_e$	Penetração de trabalho
$a_p$	Profundidade de corte
ASTM	Norma Americana (American Society for Testing and Materials)
CAD	Desenho assistido por computador (do Inglês, Computer Aided Design)
CAE	Engenharia auxiliada por computador (Computer Aided Engineering)
CAI	Índice de Abrasividade Cerchar (Cerchar Abrasivity Index)
CAM	Fabricação assistida por computador (Computer Aided Manufacturing)
CCD	Dispositivo de carga acoplada (Charge-Coupled Device)
CNC	Comando numérico computadorizado
D	Diâmetro
d.C	Depois de Cristo
DIN	Norma Alemã (Deutsches Institut für Normung)
FEPA	Norma europeia para grãos abrasivos (Federation of European Producers of Abrasives)
$F_n$	Força normal
$F_t$	Força tangencial
GSI	Índice de resistência geológica (Geological Strength Index)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	Organização internacional de normalização (International Organization for Standardization)
ISRM	Sociedade internacional de mecânica das rochas (International Society for Rock Mechanics)
IV	Infravermelho
LACER	Laboratório de materiais cerâmicos da UFRGS
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS
LVDT	Transdutor para medição de deslocamento linear (Linear Variable Differential Transformer)
MD	Metal Duro

MDF	Madeira industrializada (Medium-Density Fiberboard)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
n	Velocidade de rotação (número de rotações por minuto)
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NNO	Nor-noroeste
PCD	Diamante Policristalino (Polycrystalline Diamond)
PVD	deposição física de vapor (Physical Vapor Deposition)
RGB	Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue)
SAE	Norma Americana (Society of Automotives Engineers)
SSE	Su-sudeste
UCS	Resistência à compressão simples (Unconfined Compressive Strength)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
US Mesh	Norma americana para grãos abrasivos
$V_c$	Velocidade de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
z	Número de dentes da fresa
3D	Tridimensional (Três dimensões, x, y e z)
$\alpha$	Ângulo de folga da ferramenta
$\beta$	Ângulo de cunha da ferramenta
$\gamma$	Ângulo de corte (ou de saída) da ferramenta
$\phi$	Dimensão do sedimento
$\rho_a$	Densidade aparente
$\sigma$	Desvio padrão de $\phi$
$\sigma_c$	Resistência à compressão uniaxial
$\sigma_f$	Resistência à flexão
$\sigma_{rf}$	Resistência à tração na flexão
$\emptyset$	Diâmetro



## 1 INTRODUÇÃO

A presença do arenito é notória, em esculturas, monumentos, fachadas de prédios históricos e em muitos outros objetos de importância histórica e cultural. Esses apresentam, em muitos casos, inscrições e detalhes em alto e baixo relevo ou formas geométricas complexas. Podem-se citar alguns exemplos, no Rio Grande do Sul e no mundo: a fachada do museu Júlio de Castilhos em Porto Alegre - RS, as esculturas do Parque Pedras do Silêncio em Nova Petrópolis - RS, a Catedral de Strasbourg, na França, o Hawa Mahal (Palácio dos Ventos) em Jaipur, Índia, e a cidade de Petra, na Jordânia.

A preservação deste patrimônio é uma tarefa difícil, pois não consiste apenas em proteger de intempéries ou de atos de vandalismo. É necessário deter tecnologia capaz de restaurá-lo e reconstruí-lo em casos de acidentes naturais, como terremotos, tsunamis, inundações, tufões, furacões, ou provocados direta ou indiretamente pela ação do homem, como o caso da destruição causada pelas guerras ou incêndios. No segundo caso, pode-se citar como exemplo a Guerra da Síria, em que estão sendo destruídas importantes construções milenares que fazem parte do patrimônio histórico mundial.

A produção de réplicas no mesmo material da obra original é importante. Tem como objetivo proteger a obra original sem tirar das pessoas a oportunidade de aproximá-las o máximo possível da obra original. Um importante exemplo é a Réplica da Caverna de Chauvet em Ardèche, França (Caverne du Pont D'arc). Este empreendimento teve um custo de 55 milhões de Euros com o objetivo de levar até as pessoas o cenário da caverna, mantendo-a intacta, protegendo a arte de 35 mil anos (BBC Brasil, 2017).

Réplicas com as características originais permitem às pessoas perceberem o material além da forma geométrica, a dureza e a sensação térmica dos objetos. Estas réplicas permitem “tocar a verdade”, pois, sabendo que se trata de uma réplica, as pessoas não devem sentir-se enganadas, pelo contrário, poderão sentir-se agradecidas por terem a oportunidade de chegar o mais próximo possível do objeto real.

Neste sentido, o problema a ser resolvido é desenvolver uma tecnologia capaz de produzir réplicas do patrimônio histórico e cultural fidedignas às obras originais tanto na geometria como no material. A produção de réplicas pode permitir às pessoas a sensação do pertencimento do seu espaço e da sua cultura, e também

popularizar o acesso de quem não tem oportunidade de sentir *in loco* a percepção da obra em seu aspecto original, além de proteger os originais da erosão e do ataque químico característicos da manipulação.

Esta Tese de Doutorado trabalha com a hipótese de que por meio da Digitalização Tridimensional seja possível adquirir as características geométricas dos objetos a serem replicados com alta fidelidade e que, através do processamento por fresamento CNC, auxiliado por um software de manufatura assistida por computador (CAM), e com ferramentas e parâmetros de usinagem adequados seja possível produzir réplicas fidedignas em arenito.

Além de gerar o benefício de produzir réplicas fidedignas, com o domínio da tecnologia abordada neste trabalho, outro problema que também pode ser resolvido é agregar valor ao arenito que hoje, via de regra, é usado em sua forma mais bruta. Nesse contexto, a partir do presente trabalho possibilita-se dar forma a este material, o que além de produzir réplicas, também permite produzir objetos de formas variadas em arenito.

Neste trabalho de pesquisa foram produzidas réplicas de partes das inscrições rupestres da Pedra Grande, a partir das digitalizações feitas pela equipe do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) - UFRGS em trabalho de campo. A pedra Grande é um importante objeto do patrimônio histórico do Rio Grande do Sul, está localizada na cidade de São Pedro do Sul e contém inscrições feitas há cerca de até três mil anos.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar o processamento do arenito por usinagem CNC, a partir de peças do patrimônio cultural digitalizadas em 3D, visando obter réplicas com fidelidade. Também se pretende, pelo domínio das tecnologias 3D estudadas, poder agregar valor a essa rocha ao possibilitar a produção de objetos de formas variadas por usinagem.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar o comportamento físico mecânico do arenito da Pedreira Dorival de São Sebastião do Caí.
- Estudar o comportamento dos tipos de ferramentas (metal duro, compósitos diamantados de matriz metálica sinterizados e diamante policristalino - PCD)

para usinagem de arenito;

- Determinar parâmetros de corte, vida de ferramentas e acabamento superficial para usinagem do arenito estudado;
- Reproduzir em arenito, à luz dos parâmetros estudados, registros das inscrições rupestres da Pedra Grande, RS.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos quatro eixos principais estudados neste trabalho de pesquisa: Arenito, Usinagem, Digitalização 3D e o Abrigo da Pedra Grande. O estado da arte nas áreas envolvidas é abordado, dando maior ênfase na Usinagem de Rochas, tema de relevância nesta pesquisa.

### 2.1 ARENITO

O planeta Terra é formado por três tipos de rochas: ígneas, sedimentares e metamórficas (MADUREIRA FILHO; ATENCIO; McREATH, 2003). Segundo estes autores, as rochas ígneas ou magmáticas são originárias da solidificação do magma que se desloca do interior da Terra em direção a regiões de menor pressão e menores temperaturas, proporcionado pelo movimento das placas tectônicas. Estas rochas podem se formar no interior da Terra, como por exemplo, o granito, ou na superfície do planeta, por ações vulcânicas, como por exemplo, o basalto. As rochas sedimentares são formadas pela compactação e/ou cimentação de fragmentos de outras rochas, produzidos pela ação de agentes de intemperismos e transportados, pela ação dos ventos, gravidade ou águas, até uma bacia de sedimentação. As rochas metamórficas resultam da transformação de uma rocha preexistente no estado sólido, devido a um processo geológico de transformação, que ocorre por aumento de pressão e/ou temperatura, de tal modo que esta temperatura não atinja o ponto de fusão dos minerais da rocha.

A formação das rochas obedece a um ciclo. As rochas ígneas, que se formam pela consolidação de um magma (seja no interior ou na superfície do planeta), sofrem desagregação física e química e seus produtos são transportados para depósitos sedimentares que, por compactação e/ou cimentação (diagênese), se transformam em rochas sedimentares; estas, por sua vez, por ação de pressão e temperaturas elevadas se transformam em rochas metamórficas. Ao aumentar a pressão e, especialmente, a temperatura, em determinado ponto ocorrerá a fusão e novamente ocorrerá a formação de uma rocha ígnea, dando início a um novo ciclo (MADUREIRA FILHO; ATENCIO; McREATH, 2003).

As rochas ígneas e metamórficas constituem a maior parte da crosta terrestre, sendo que os sedimentos e rochas sedimentares perfazem apenas 5% do seu

volume que, por sua vez, responde por 1% do volume total da Terra. Por outro lado, a área de exposição das rochas sedimentares abrange cerca de 75% da superfície terrestre e 90% dos leitos marinhos, ou seja, 80 a 90% da superfície do planeta são cobertos por sedimentos e rochas sedimentares (SGARBI, 2007).

Dietrich e Skinner (1979, apud SGARBI, 2007) sugerem que apenas três variedades de rochas respondam pela maior parte das rochas sedimentares: lamitos, 47% (diâmetro das partículas entre 1/256 mm e 1/16 mm); arenitos, 31% (diâmetro das partículas entre 1/16 mm e 2 mm); e as rochas carbonáticas, 22%.

Arenito é uma rocha composta de uma mistura de grãos minerais, de fragmentos de minerais e de rochas, oriundos da desagregação por erosão de rochas de todos os tipos (PETTIJHON; POTTER; SIEVER, 1973). Para Nichols (2009), arenito é uma rocha formada por areia. Mas areia, segundo Giannini e Riccomini (2000), é um conceito relativo ao tamanho de grão. De acordo com a escala de granulometria de Wentworth (1922), utilizada para classificar sedimentos, um grão de areia possui entre 0,062 e 2 mm de diâmetro. Então, pode-se conceituar arenito como sendo uma rocha formada por sedimentos com tamanho de grão entre 0,062 e 2 mm e aglutinados por um tipo de cimento, formado por um processo geológico, que dará consistência à rocha, transformando-a de areia em arenito, uma rocha sólida.

Embora o arenito seja formado por muitos tipos de rochas, durante o processo de sedimentação muitos minerais podem ser perdidos ou modificados durante o intemperismo, transporte e a diagênese, permanecendo ao final, praticamente só grãos de quartzo<sup>1</sup>, devido à sua dureza e estabilidade química. Alguns tipos de arenitos chegam a conter 95,4% de grãos de quartzo (PETTIJHON; POTTER; SIEVER, 1973).

Diagênese é um conjunto amplo de processos físicos, químicos e biológicos, pós-deposicionais, pelos quais os depósitos sedimentares originais e suas águas intersticiais reagem, na tentativa de alcançar o equilíbrio textural e geoquímico com

---

<sup>1</sup>Quartzo é o segundo mineral mais abundante da Terra (12 % em volume). Possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO<sub>2</sub>). Tem dureza 7 na escala de Mohs .

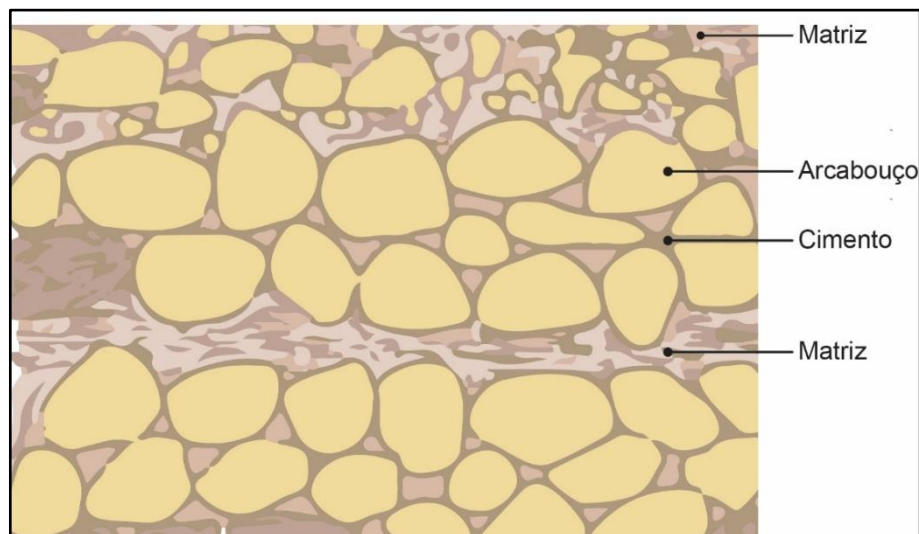
seu ambiente (CURTIS,1977; BURLEY et al.,1985, apud WORDEN e BURLEY, 2003).

Segundo Pettijohn, Potter e Siever (1973), os arenitos e as demais rochas sedimentares apresentam grande importância para a geologia, pois os sedimentos que compõem estas rochas, o tamanho e forma dos grãos, os minerais constituintes dos grãos e a forma de sedimentação, ajudam a desvendar eventos geológicos pelos quais essa rocha passou. Por exemplo, se os grãos são pequenos e arredondados, significa que viajaram bastante, foram carregados por longas distâncias e, devido ao rolamento, foram quebrando as arestas vivas e tornando-se arredondados. O tipo de estratificação das rochas sedimentares, plana, cruzada, ondulada, ou outras formas, também trazem registros de eventos passados que ajudam a elucidar como se formaram estas rochas. Também a presença de fósseis nessas rochas é importante para informar a história biológica da região.

Além de informar eventos geológicos passados, os arenitos têm grande importância econômica, pois em geral são porosos e podem propiciar a formação de grandes reservatórios de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural) e de água, como, por exemplo, o Aquífero Guarani.

Assim como as demais rochas sedimentares, os arenitos são formados por três componentes principais: arcabouço, matriz e cimento. A figura 1 mostra de forma esquemática estes componentes distribuídos na rocha.

**Figura 01 - Componentes de uma rocha sedimentar**



Fonte: Adaptado de Giannini (2000)

O arcabouço corresponde à fração clástica principal (que dá nome à rocha ou depósito) e às frações mais grossas. Nos arenitos são os grãos de areia. O material clástico mais fino compõe a matriz. No caso do arenito, a matriz é constituída por grãos de sedimentos menores que 0,062 mm, ou seja, silte e argila. O cimento é um componente secundário, isto é, ele é formado durante o processo diagenético. É formado pelos sedimentos de grãos menores que, através da diagênese, se tornam responsáveis pela união de todos os grãos de areia, passando de sedimentos para rocha sedimentar (GIANNINI, 2000).

### 2.1.1 Classificação dos Arenitos

Segundo Greensmith (1973), muitos métodos para classificação de arenitos foram propostos, alguns baseados em princípios teóricos, alguns com ênfase na composição mineral e outros criados empiricamente para conveniência no campo e descrições de laboratório. Uma das classificações de maior importância é a de Pettijohn (1954), pois é baseada em três importantes parâmetros: índice de proveniência, maturidade e fluidez do meio de depósito. Estes são o “índice fonte da rocha” ou proporção de feldspato<sup>2</sup> em relação aos fragmentos de rocha, o “índice de maturidade” ou proporção de quartzo para feldspato mais fragmentos de rocha e o “índice de fluidez” ou relação de areias detríticas em relação à matriz detrítica intersticial.

Baseado nestes três parâmetros, os arenitos podem ser classificados em quatro classes principais e várias outras menores. Os principais grupos são as grauvacas, arenitos líticos, arenitos arcósios e ortoquartzitos (quartzo-arenitos).

Ortoquartzitos: segundo Greensmith (1973), são arenitos que contém alta quantidade de quartzo (mais que 95 %), e são tratados pela literatura moderna com várias nomenclaturas: ortoquartzitos, quartzo-arenitos, arenitos de quartzo puro e arenitos quartzosos. Segundo Sgarbi (2007), os quartzo-arenitos são os arenitos mais conhecidos. A sílica (SiO<sub>2</sub>) é o cimento mais comum, notadamente nos quartzo-arenitos mais antigos e sua cor geralmente é branca, podendo ser rósea ou avermelhada devido à presença de hematita. Geralmente são de origem litorânea.

---

<sup>2</sup> Feldspato: Os feldspatos são grupo de minerais mais abundantes na Terra. A composição química dos feldspatos é descrita pela fórmula (K, Na, Ca) (Si, Al)<sub>4</sub> O<sub>8</sub>. São silicatos de alumínio contendo diferentes proporções de cálcio, potássio e sódio. Eles ocorrem em rochas graníticas e são os principais minerais dos pegmatitos, associados a diversos outros minerais.

Arenitos Arcósios: são arenitos de granulação média a grossa, constituídos por quartzo e feldspatos normalmente na forma de grãos pouco arredondados. Segundo Sgarbi (2007), são também denominados arenitos feldspáticos, constituídos por cerca de 25% ou mais de feldspato e menores quantidades de fragmentos de rochas, sendo que os subarcósios apresentam menor quantidade de feldspato (5 a 25%). Conforme o quadro 1, podem apresentar conteúdo de quartzo e chert<sup>3</sup> de 75 a 95%. Sua matriz contém, normalmente, argila, e os grãos arenosos, em geral, apresentam coloração avermelhada devido à presença de óxido de ferro, mas também podem apresentar cor cinza. Segundo Darwin (2006), esse arenito rico em feldspato provém de terrenos graníticos e metamórficos rapidamente erodidos onde o intemperismo químico é subordinado ao físico. São originados, geralmente, de leques aluviais<sup>4</sup>.

Arenitos Líticos: segundo Greensmith (1973), correspondem aos protoquartzitos, subgrauvacas e sublitoarenitos. O conteúdo de quartzo, quartzito e chert varia entre 40 e 95%, feldspato entre 5 e 10% e fragmentos de rocha entre 5 e 25%. Pettijohn (1970) sugere que a matriz detrítica, principalmente argila, não seja superior a 15% da rocha. Segundo Sgarbi (2007), arenitos líticos normalmente mostram grande complexidade química e mineralógica e, dentre eles, muitos fragmentos derivados de rochas de textura fina, predominantemente folhelhos, rochas vulcânicas e rochas metamórficas de grão fino. Segundo Darwin (2006), geralmente, tem origem em deltas<sup>5</sup>.

Grauvacas ou Wackes: segundo Greensmith (1973), são, dentre os arenitos, provavelmente, o grupo mais difícil de definir. Isto se deve, em parte, à complexidade de sua mineralogia. Grauvacas são formadas por grãos de quartzo angulares e sub arredondados, grãos de feldspato e fragmentos de rocha cimentados por uma matriz de grãos finos. A classificação que leva em conta a

---

<sup>3</sup> Chert: Rocha composta principalmente de sílica, onde os cristais de quartzo apresentam tamanho submicroscópico (criptocristalino).

<sup>4</sup> Leques aluviais são depósitos sedimentares formados no sopé de montanhas pela erosão de rios ou derretimento de neve em vales de montanhas cuja feição topográfica é de um leque.

<sup>5</sup> Delta é a foz de um rio formada por vários canais com acúmulo de sedimentos. Ocorrem em rios de planície devido a pequena declividade que dificulta a descarga de água e favorece o depósito de sedimentos. Tem forma de triângulo e por isso são chamados de delta.



matriz, conforme Pettijohn (1954, apud GREENSMITH, 1973), indica que esta deve formar mais de 15% da rocha. O conteúdo de feldspato é usualmente maior que 5% e de fragmentos de rocha, geralmente, maior que 10%. São arenitos de cor escura.

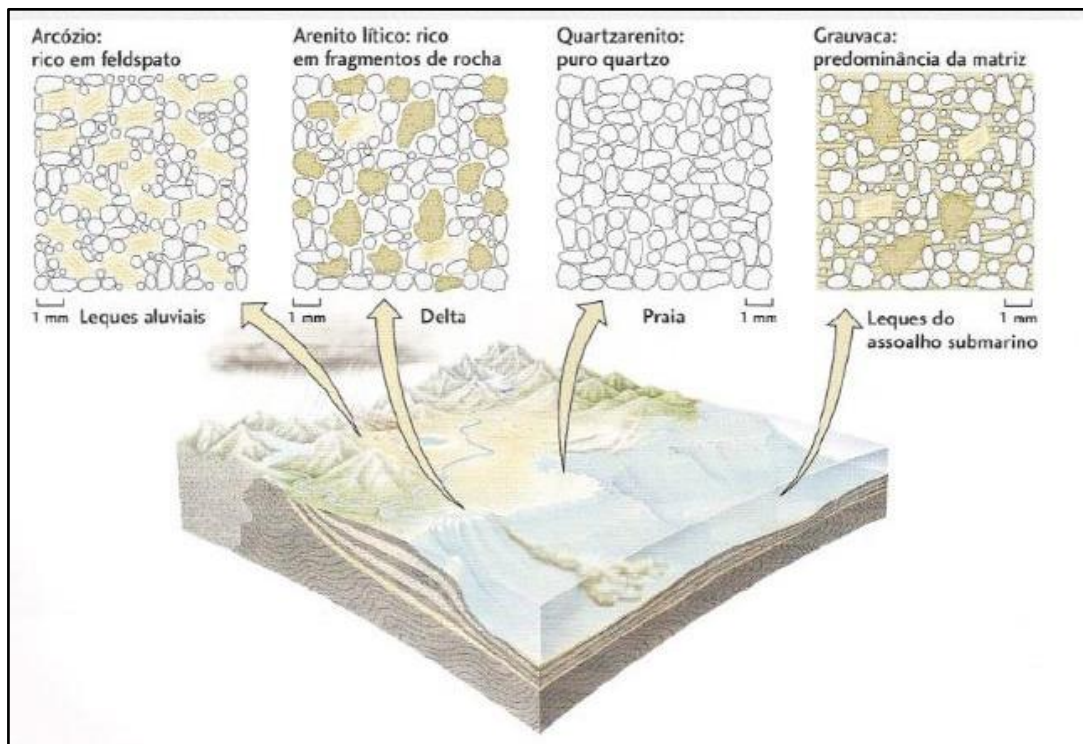
O quadro 1 mostra a classificação proposta por Pettijohn em 1954 e a figura 2 mostra, esquematicamente, a mineralogia e a origem dos principais tipos de arenito abordados neste trabalho.

**Quadro 01 - Classificação dos arenitos**

Matriz ou Cimento		Matriz detrítica entre 15% e 75%		Matriz Detrítica menor que 15%		
Fração de Areias Detríticas	Feldspato > Fragmentos de Rocha	Grauvaca com mais de 5% de feldspato e menos de 10% de Fragmentos de rocha	Grauvaca Feldspática	Arenito Arcósio		Ortoquartzito (Quartzo-arenito)
				Arenito Arcósio	Arenito Subarcósio ou Quartzito Feldspático	
	Feldspato < Fragmentos de Rocha	Grauvaca Lítica	Arenito Lítico		Chert Detrítico maior que 5%	
	Subgrauvaca		Protoquartzito			
Conteúdo de Quartzo + Chert		< 75%		>75% < 95%		> 95%

Fonte: Adaptado de Pettijohn(1954) e McBride (1962), apud Greensmith(1973)

**Figura 02 - Mineralogia dos principais tipos de arenito e origem**



Fonte: Darwin (2006)

### **2.1.2 Fatores Determinantes das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Arenitos.**

As propriedades físicas e mecânicas dos arenitos dependem diretamente do material sedimentado que deu origem à rocha e do processo diagenético envolvido. Com relação ao material sedimentado, além da composição química também merecem importância o tamanho, forma e grau de seleção dos clastos, grau de seleção dos sedimentos, as estruturas sedimentares, a estratificação e a maturidade textural e mineralógica do sedimento, bem como sua porosidade e permeabilidade.

O processo diagenético é de fundamental importância na formação do cimento e da matriz da rocha, que também são muito importantes para a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas. As condições naturais que comandam este processo, segundo Sgarbi (2007), são temperatura inferior a 200°C, pressão de 1 a 2.000 kgf/cm<sup>2</sup> (1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0,0981 Mpa), fluidos variando de água doce a hipersalina e profundidade variando desde a superfície até 6.000 m. Os principais mecanismos envolvidos são: compactação mecânica por soterramento, diminuindo a porosidade; cimentação da rocha por sílica, carbonato de cálcio, argilominerais e/ou óxidos de ferro; dissolução química dos componentes clásticos por pressão de soterramento dos grãos; infiltração mecânica de argilas entre grãos arenosos em ambiente desértico; coloração de arenitos em ambientes áridos.

Dentre os mecanismos envolvidos durante o processo diagenético, a cimentação é de extrema importância para determinar muitas características físicas dos arenitos. A cimentação por sílica, também chamada de silicificação, é responsável pela formação dos arenitos silicificados, conferindo excelentes propriedades físicas e mecânicas. A silicificação, segundo Paraguassu (1972 apud ARAUJO, 1992), é um processo que ocorre rapidamente por meio de soluções aquosas saturadas em sílica, que percolam através dos poros do arenito inconsolidado e precipitam, formando assim o cimento silicoso. Segundo Araujo (1992), a silicificação é, provavelmente, o fator de maior importância na formação das propriedades físicas dos arenitos silicificados. Desse processo resulta a formação de uma rocha coesa, onde os grãos de quartzo e o cimento possuem a mesma composição química (SiO<sub>2</sub>). Isso faz com que o arenito silicificado se torne uma rocha homogênea, apresentando isotropia física.

As composições químicas, tanto dos sedimentos como da matriz, também são fatores determinantes das propriedades físicas e mecânicas dos arenitos. Petijohn,

Potter e Siever (1973) propuseram a classificação química mostrada no quadro 2, não com o objetivo de fazer uma classificação dos tipos de arenitos em função da composição química, mas com o objetivo de estabelecer relações entre a composição química e os tipos de arenito e, ainda, fazer uma relação com composição química e maturidade dos arenitos.

**Quadro 02 - Classificação química dos arenitos**

Quadro Estrutural: Grupo de Ânions	Cátions Trocáveis		Tipo Petrográfico Associado
Alto $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Maduro) (Pequena quantidade de argila ou silicato de Al destrítico)	Rico em alcalinos terrosos (Cimento carbonático) Pobre em alcalinos terrosos (Cimento silicoso)		Quartzo-arenitos
Baixo $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Imaturo) (Argila + Silicato de Al destrítico)	Rico em metais alcalinos (Feldspato e argilas)	$\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$	Grauvacas feldspáticas
		$\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$	Arcósios; Grauvacas líticas
	Pobre em metais alcalinos (Argilas aluminosas)		Arenitos líticos

Fonte: Adaptado de Pettijohn (1973)

Os mesmos autores também apresentaram a classificação mostrada na tabela 1, a qual mostra a composição química dos principais tipos de arenitos e ainda apresenta composição química média de três grupos de amostras, A, B e C. Para compor os valores da composição química média dos arenitos do grupo A foram analisados 253 arenitos, para o grupo B foram analisados 371 arenitos usados para construção e para o grupo C foram computados a média de 26 grauvacas, média de 25 arenitos líticos, média de 15 arenitos arcósios e média de 34 quartzo-arenitos.

Tabela 01 - Composição química dos principais tipos de arenito

Composição	Quartzo-arenito	Arenito Lítico	Grauvaca	Arenitos Arcósios	Média de Arenitos		
					A	B	C
SiO <sub>2</sub>	95,4	66,1	66,7	77,1	78,66	84,86	77,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,1	8,1	13,5	8,7	4,78	5,96	7,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	3,8	1,6	1,5	1,08	1,39	1,7
FeO	0,2	1,4	3,5	0,7	0,3	0,84	1,5
MgO	0,1	2,4	2,1	0,5	1,17	0,52	1,2
CaO	1,6	6,2	2,5	2,7	5,52	1,05	3,1
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,9	2,9	1,5	0,45	0,76	1,2
K <sub>2</sub> O	0,2	1,3	2	2,8	1,32	1,16	1,3
H <sub>2</sub> O+	0,3	3,6	2,4	0,9	1,33	1,47	1,7
H <sub>2</sub> O-		0,7	0,6		0,31	0,27	0,4
TiO <sub>2</sub>	0,2	0,3	0,6	0,3	0,25	0,41	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,1	0,2	0,1	0,08	0,06	0,1
MnO		0,1	0,1	0,2	traço	traço	0,1
CO <sub>2</sub>	1,1	5	1,2	3	5,04	1,01	2,5
SO <sub>3</sub>			0,3		0,07	0,09	0,1
Cl					traço	traço	traço
F							traço
S			0,1				traço
BaO					0,05	0,01	traço
SrO					traço		traço
C			0,1				traço
<b>Total</b>	<b>100,7</b>	<b>100</b>	<b>100,4</b>	<b>100</b>	<b>100,41</b>	<b>99,86</b>	<b>100</b>

A. Análise da composição de 253 arenitos.

B. Análise da composição de 371 arenitos usados para construção.

C. Computado, tomando a média de 26 grauvacas, média de 25 arenitos líticos, média de 15 arenitos arcósios e média de 34 quartzo-arenitos.

Fonte: Adaptado de Pettijohn, Potter e Siever (1973)

O tamanho da partícula é um importante parâmetro da textura das rochas detríticas porque ele fornece informações das condições de transporte, seleção e deposição do sedimento (SGARBI, 2007). Segundo Pettijohn, Potter e Siever (1973), sedimentos de pequeno tamanho e de formas arredondadas dão informações de que viajaram bastante desde a sua origem até a bacia de sedimentação. Quanto menores forem os fragmentos mais facilmente podem ser transportados, tanto pela água como pelo vento, podendo viajar até bacias sedimentares muito distantes de onde se originaram. Quanto mais longa for a viagem, mais duro e menor é o sedimento residual, conferindo propriedades de maior dureza à rocha. Folk (1980) revisa, em seu trabalho, metodologia para determinar tamanho de grão e forma. Segundo ele, a tabela de classificação granulométrica mais comumente utilizada é a de Wentworth (1922), conforme mostrado na tabela 2. Esta tabela é dotada de uma escala logarítmica na qual a mudança de uma classe de grão menor para maior, imediatamente acima, na escala em mm, sempre vai representar o dobro do tamanho da anterior e, no caso da maior para a menor, a classe seguinte representará a metade da dimensão da anterior. Posteriormente, esta tabela foi complementada com a escala  $\phi$  (phi), criada por Krumbein em 1934. Segundo Folk (1980), esta é uma maneira muito mais conveniente de apresentar dados do que a escala em mm e por esta razão os trabalhos mais recentes utilizam a escala  $\phi$ . A equivalência de mm para  $\phi$  é apresentada na equação 1:

$$\phi = -\log_2(\text{dimensão do sedimento em mm}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Com relação à morfologia das partículas, pelo menos quatro conceitos estão envolvidos: forma, esfericidade, arredondamento e características da superfície (FOLK,1980).

Forma é uma medida da relação entre as três dimensões principais de um objeto, e assim, as partículas podem ser classificadas quantitativamente como compactas (ou equidimensionais), alongadas (ou em forma de bastonetes) e laminares (ou em forma de discos), com várias categorias intermediárias (FOLK, 1980). Segundo este autor, forma é uma propriedade cuja definição é simples, mas que pode ser medida de várias maneiras.

Tabela 02 - Classificação granulométrica de Wentworth e sua relação com a classificação Phi


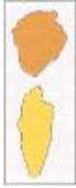






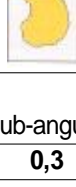
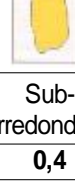
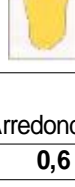
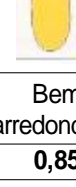
Malha de Peneira Padrão USA (US Mesh)	Milímetros	Phi ( $\phi$ )	Classes de Tamanho de Wentworth	
Uso de quadrados de Arame	4096	-12	Matacão	<b>Cascalho</b>
	1024	-10		
	256	-8	Bloco/calhau	
	64	-6	Seixo	
	16	-4	Grânulo	
5	4	-2		
6	3,36	-1,75		
7	2,83	-1,5		
8	2,38	-1,25	Areia muito grossa	
10	2	-1		
12	1,68	-0,75		
14	1,41	-0,5		
16	1,19	-0,25		
18	1	0		Areia grossa
20	0,84	0,25		
25	0,71	0,5		
30	0,59	0,75		
35	( $\frac{1}{2}$ ) 0,5	1		Areia média
40	0,42	1,25		
45	0,35	1,5		
50	0,3	1,75		
60	( $\frac{1}{4}$ ) 0,25	2	Areia fina	
70	0,21	2,25		
80	0,177	2,5		
100	0,149	2,75		
120	( $\frac{1}{8}$ ) 0,125	3	Areia muito fina	
140	0,105	3,25		
170	0,088	3,5		
200	0,074	3,75		
230	( $\frac{1}{16}$ ) 0,0625	4	Silte grosseiro	<b>Lama</b>
270	0,053	4,25		
325	0,044	4,5	Silte médio	
	0,037	4,75		
Analisado por pipeta ou hidrômetro	( $\frac{1}{32}$ ) 0,031	5	Silte fino	
	( $\frac{1}{64}$ ) 0,0156	6	Silte muito fino	
	( $\frac{1}{128}$ ) 0,0078	7	Argila	
	( $\frac{1}{256}$ ) 0,0039	8		
	0,002	9		
	0,00098	10		
	0,00049	11		
	0,00024	12		
	0,00012	13		
0,00006	14			

Fonte: Adaptado de Folk, (1980)

Segundo Araujo (1992), esfericidade é o grau de aproximação da área de uma partícula qualquer com a área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula. Vários autores, entre eles Wentworth (1922) e Waddell (1934), estabeleceram equações matemáticas para determinar o grau de esfericidade das partículas. Uma esfera perfeita tem esfericidade 1 e a maioria dos grãos de areia tem esfericidade entre 0,6 e 0,7 calculados pelo método de Waddell (1934).

Arredondamento, para Pettijohn (1970), tem relação com a agudez dos cantos, independente da forma. Foi primeiramente medido por Wentworth (1919), que considerou quantitativamente a medida da curvatura dos cantos. Mais tarde foi definido por Waddell (1932) como uma relação entre a média das curvaturas dos cantos dividida pelo raio do maior círculo inscrito no grão. Porém, segundo Folk (1980), isto é praticamente impossível medir, então esta medição passou a ser feita por comparação com cartas fotográficas de grãos de areia. Uma esfera perfeita tem valor de esfericidade 1 e arredondamento também igual a 1, enquanto que a maioria das areias tem valores de arredondamento próximos de 0,3 a 0,4 na escala de Waddell (1932). Conforme Pettijohn (1970), um cilindro de pontas esféricas pode ter arredondamento 1, embora seu valor de esfericidade seja muito menor. A figura 3 ajuda a esclarecer as relações entre esfericidade e arredondamento.

**Figura 03 - Grau de esfericidade e arredondamento**

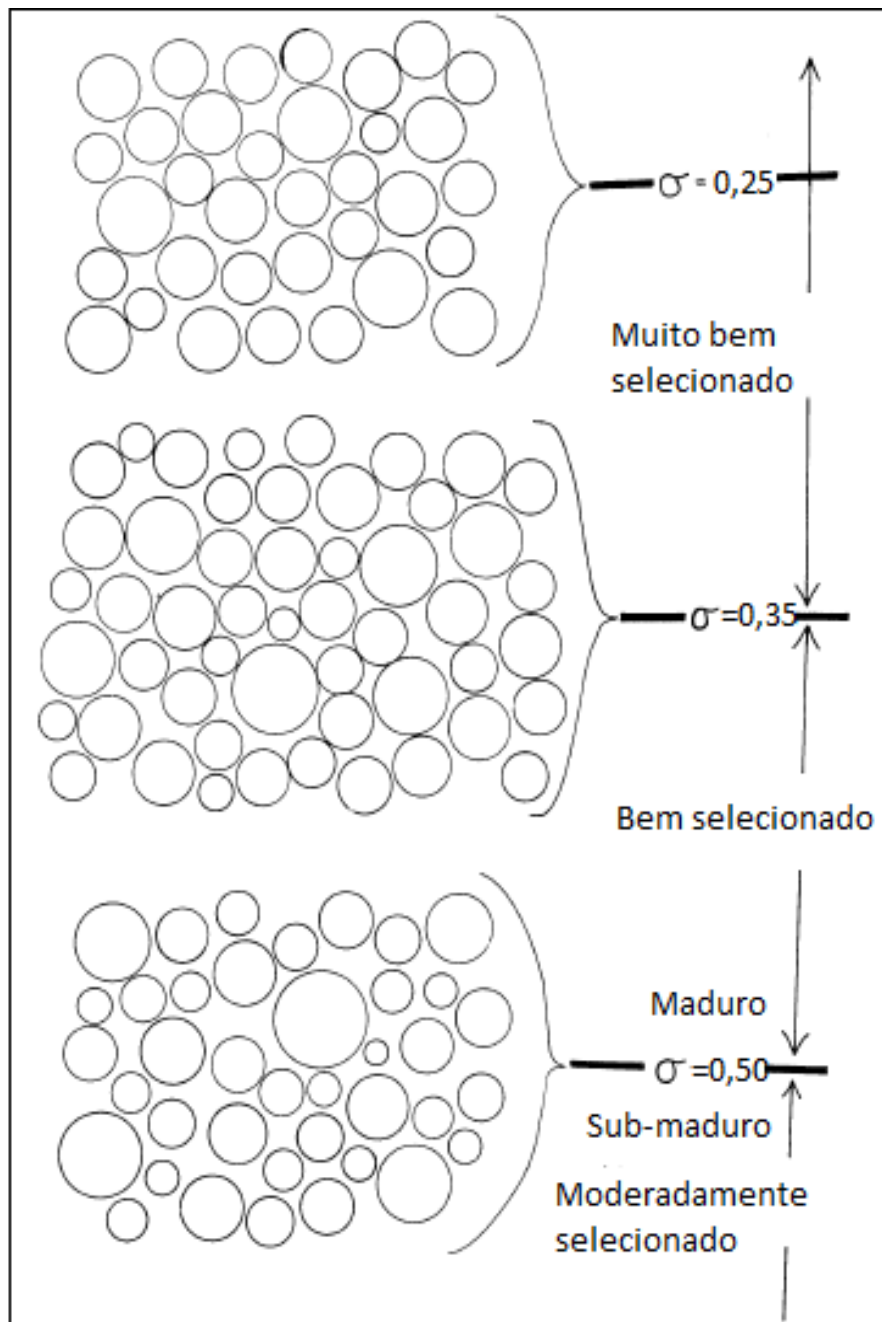
<b>ESFERICIDADE E ARREDONDAMENTO</b>							
<b>ESFERICIDADE</b>	<b>ALTA</b>						
	<b>BAIXA</b>						
<b>ARREDONDAMENTO</b>		Muito Angular <b>0,15</b>	Angular <b>0,2</b>	Sub-angular <b>0,3</b>	Sub-arredondada <b>0,4</b>	Arredondada <b>0,6</b>	Bem arredondada <b>0,85</b>

Fonte: Adaptado de Sgarbi (2007)

Segundo Sgarbi (2007), uma rocha é dita bem selecionada texturalmente quando a maioria dos seus constituintes possui dimensões semelhantes. O grau de seleção da rocha pode ser avaliado através do uso de uma lupa de mão, no campo, e por técnicas de peneiramento, em laboratório, se o sedimento não estiver muito consolidado. Também pode ser usada uma lupa binocular ou um microscópio óptico.

Folk (1980) estabeleceu um critério para grau de seleção, baseado no valor de  $\sigma$ , que é o desvio padrão de Phi ( $\phi$ ). A figura 4 mostra exemplos de graus de seleção de rochas sedimentares: muito bem selecionado, bem selecionado e moderadamente selecionado, baseado nos valores de  $\sigma$ , e ainda faz uma relação com a maturidade textural da rocha. Valores de  $\sigma$  entre 1 e 2 significa mal selecionado e  $\sigma$  maior que 2 significa muito mal selecionado.

**Figura 04 – Grau de seleção de uma rocha sedimentar**



$\sigma$  = desvio padrão de  $\phi$ ,  $\phi = -\log_2(\text{dimensão do sedimento em mm})$

Fonte: Adaptado de Folk (1980)



Segundo Pettijohn, Potter e Siever (1973), tal como a textura e a composição, as estruturas sedimentares e a estratificação são inerentes à sedimentação. Pelo fato da maioria das estruturas poderem ser vistas a olho nu, seu estudo é tão antigo quanto a Geologia, mas só recentemente pesquisas têm contribuído significativamente para o seu estudo mais aprofundado. A estratificação, também chamada de acamadamento, consiste na disposição característica dos sedimentos nas rochas sedimentares. A forma da estratificação é muito importante porque ajuda a identificar a forma e o agente de transporte dos sedimentos e também tem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas da rocha. Pettijohn, Potter e Siever (1973) abordam as estruturas e a estratificação dos arenitos, basicamente, sob dois aspectos importantes, sendo um de forma macroscópica, ou com uma visão externa e o outro com uma visão mais concentrada na estrutura interna da rocha. Esta visão externa é voltada para o afloramento ou para a formação rochosa, onde se analisa espessura das camadas das diferentes unidades sedimentares, ângulo da estratificação, direção e largura da formação. Do ponto de vista interno das estruturas, são estudadas as principais formas ou tipos de estratificação: estrutura massiva; estratificação laminada, horizontal, inclinada e cruzada; estratificação gradada; estratificação imbricada e outras formas oriundas de deformações. Esses tipos de estratificações são melhor detalhados a seguir.

Estrutura ou estratificação massiva, também chamada de maciça ou sem estrutura, são estruturas onde não houve um posicionamento preferencial ou organizado dos sedimentos. São estruturas bastante raras de encontrar. Sgarbi (2007) sugere que seja formada por sedimentação muito rápida, a partir de suspensão e ausência de tração nos sedimentos.

Estratificação laminada ou plana, segundo Pettijohn, Potter e Siever (1973), é moderadamente comum e muitas pedreiras com este tipo de estratificação produzem excelentes lajes para pisos e revestimentos. Segundo Sgarbi (2007), a estratificação plana é atribuída à forma de leito plano em regime de fluxo superior e as partículas depositadas sob essas condições dispõem-se com o eixo maior paralelo à direção do fluxo. Essa lineação preferencial das partículas facilita a exploração manual das pedreiras, devido à formação de regiões preferenciais para separação e corte das pedras. Estas camadas laminadas podem estar na horizontal ou apresentar alguma inclinação em relação ao plano horizontal. A figura 5 mostra um exemplo de uma pedreira de arenito em atividade, com estratificação plana na

base, com leve inclinação em relação à horizontal, localizada em São Sebastião do Caí – RS.

Estratificação cruzada, segundo Darwin (2006), consiste em conjuntos de unidades sedimentares inclinadas em relação à horizontal, com ângulo de até 35°. Quando são de origem eólica, as estratificações cruzadas podem assumir formas complexas, devido às mudanças da direção do vento. Também podem ser originadas por ambientes de rios e mares e constituem uma das estruturas sedimentares mais comuns em arenitos. A figura 6 mostra um exemplo de estratificação cruzada em um arenito originado num ambiente desértico, fotografado no Parque Nacional Zion, no sudoeste de Utah, USA.

**Figura 05 - Arenito com estratificação plana na base, da formação Botucatu, localizado na Pedreira Dorival em São Sebastião do Caí – RS**



**Figura 06 - Arenito com estratificação cruzada em um arenito originado num ambiente desértico, fotografado no Parque Nacional Zion, no sudoeste de Utah, USA**



Fonte: Peter Kresan, apud Darwin (2006)

Estratificação gradada ou gradacional, segundo Pettijohn, Potter e Siever (1973) é definida pela diminuição do tamanho dos grãos sedimentares, de baixo para cima, dentro da unidade sedimentar, isto é, os grãos maiores ficam na base e vão diminuindo de tamanho a medida que vai se direcionando para o topo. São originadas por deposições onde ocorreu um decaimento no fluxo da corrente e as camadas com esse tipo de estrutura podem variar de um centímetro ou menos até vários metros de espessura.

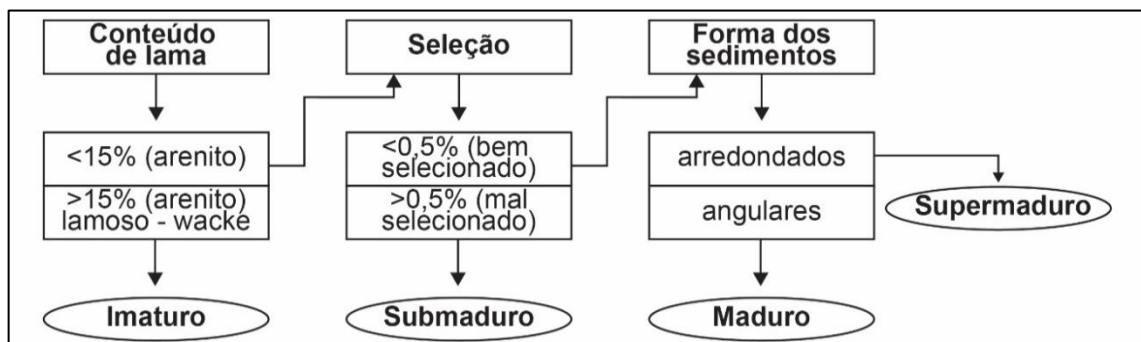
Outro fator de extrema importância a ser considerado, quando se trata de influência nas propriedades físicas e mecânicas dos arenitos, é a maturidade. A maturidade pode ser expressa tanto em termos mineralógicos (química) como em termos texturais (física).

A maturidade textural, segundo Folk (1980), é dividida em quatro estágios: imaturo, submaduro, maduro e supermaduro, com base no conteúdo de argila e da seleção e arredondamento dos grãos de areia.

- Fase imatura: Sedimentos contêm mais de 5% de matriz argila terrígenos. São compostos de grãos de areia geralmente mal classificados e angulares.
- Fase submadura: sedimentos contêm menos de 5% de argila, mas os grãos de areia são mal classificados e não são bem arredondados.
- Fase madura: sedimentos contêm pouca ou nenhuma argila e os grãos são bem classificados, mas ainda não bem arredondados.
- Fase supermadura: sedimentos não contêm argila e os grãos de areia são bem classificados e bem arredondados.

Para Folk (1980), maturidade textural é uma das mais importantes chaves para indicar a natureza física do ambiente de deposição, uma vez que proporciona uma escala que indica o grau de desgaste do grão por abrasão devido à sua movimentação. Assim, sedimentos imaturos se acumulam em locais como planícies de inundação, leques aluviais ou ambientes lagunares, onde a deposição é muito rápida de modo que os sedimentos não têm possibilidade de serem submetidos à entrada de qualquer energia mecânica após a deposição. Sedimentos supermaduros, por outro lado, indicam deposição em locais de intensa abrasão e seleção, tais como praias e dunas de deserto, onde a energia está constantemente a desgastar os grãos. A determinação da maturidade textural de um sedimento ou de uma rocha sedimentar pode ser representada pelo fluxograma da figura 7 (NICHOLS, 2009).

**Figura 07 - Fluxograma da determinação da maturidade textural das rochas sedimentares siliciclásticas**



Fonte: Adaptado de Nichols (2009)

Pettijohn, Potter e Siever (1973), em termos mineralógicos, também classificam arenitos em maduros e imaturos usando a proporção de  $\text{SiO}_2$  para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Os arenitos maduros, ricos em quartzo, apresentam altas taxas de  $\text{SiO}_2$  em relação

a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em virtude da ausência de aluminossilicatos, quer seja argila ou silicatos<sup>6</sup> primários.

O índice de maturidade mineralógica pode ser apresentado pela proporção combinada de quartzo, sílex e meta quartzito (HUBERT, 1962, apud WU e CHANGI, 1992). Um arenito composicionalmente imaturo contém muitos fragmentos líticos finos, isto é, minerais e fragmentos de rochas instáveis e altos teores de feldspato. Quando os fragmentos de rocha são de uma variedade mais estável e há algum feldspato e maior quantidade de quartzo, então o sedimento é chamado maduro. Para um arenito composto quase inteiramente por quartzo, aplica-se o termo supermaduro. O quadro 2 (pág. 35) mostra as relações entre maturidade e composição mineralógica estabelecidas por Pettijohn (1973).

A porosidade e a permeabilidade também exercem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas dos arenitos. Porosidade de uma rocha é a porcentagem, em volume, de espaços vazios nessa rocha. Ao contrário das rochas cristalinas, que tem porosidade quase zero, as rochas sedimentares clásticas são de porosidade média a alta. Essa porosidade se deve ao empilhamento dos sedimentos, que não permitem que os grãos sedimentares fiquem em contato contínuo entre si. A natureza porosa destes sedimentos é a condição principal para a sua reorganização diagenética. Sempre haverá um espaço vazio entre os grãos e uma distribuição não uniforme de pressão sobre eles para suportarem as camadas superiores, pois eles se tocam apenas em alguns pontos. Isto leva à dissolução em alguns pontos e à deposição de cimento nos espaços vazios. Também o fluido que ocupa os poros constitui um meio em que pode haver reações químicas, onde ele mesmo reage com o arcabouço sólido do sedimento. O sistema de poros serve também como um canal para movimentação de fluido e para armazenamento. Por isso, o volume desses espaços e a capacidade de armazenamento que resultam da rocha e transmissibilidade entre eles são de grande importância na pesquisa de reservatórios de petróleo, gás e águas subterrâneas. A porosidade está ligada ao processo diagenético, pois ela diminui com o tempo. Quanto maior for o processo

---

<sup>6</sup> Silicatos são minerais formados por Silício e Oxigênio (geralmente na forma  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{SiO}_4$ ) em forma de tetraedro e um ou mais metais. Incluem todas as formas da sílica, feldspatos, anfíbios, piroxênios, quartzos micas e outros. Os silicatos representam aproximadamente 90% do peso total da crosta da Terra.

diagenético na rocha, menos poros ela terá, tornando-a mais semelhante com as rochas metamórficas ou ígneas (PETTIJOHN, 1970).

Segundo Pettijohn (1970), permeabilidade é a capacidade que a rocha tem de deixar passar através dela algum tipo de fluido. Logo, permeabilidade tem a ver com a ligação entre os poros da rocha, pois uma rocha pode ser porosa e não permeável. Esta propriedade é importante para a formação e exploração de reservatórios de hidrocarbonetos e águas subterrâneas.

Se por um lado a presença de porosidade é uma característica importante para a rocha, por outro lado pode ser extremamente prejudicial dependendo da aplicação que se quer dar para essa rocha. Muitas propriedades físicas e mecânicas são prejudicadas pela porosidade da rocha, como a resistência mecânica à compressão, por exemplo.

### **2.1.3 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Arenitos**

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das rochas é de extrema importância para sua correta utilização. Estas propriedades são investigadas em função de sua aplicação (FRASCÁ, 2002).

Segundo Alencar (2013), inicialmente as rochas ornamentais tinham função estrutural nas construções. Atualmente, o uso do concreto armado, do aço e de outros materiais, que aliam a resistência à facilidade de construção, permitiu a aplicação de rochas ornamentais com finalidade mais específicas, para pisos e revestimentos de paredes e fachadas. Embora o uso do concreto armado tenha facilitado o trabalho de engenheiros e arquitetos, ainda existem situações em que a rocha deve fazer este duplo papel, estrutural e de revestimento. Neste caso, o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da rocha é fundamental.

Em função da grande aplicação das rochas para fins ornamentais, para pisos e revestimentos de paredes, normas e procedimentos específicos foram adotados para sua caracterização tecnológica. Segundo Frascá (2002), a caracterização tecnológica de rochas, para esta finalidade, é realizada por meio da execução de diferentes ensaios e análises. O conjunto básico de ensaios com as respectivas normas está relacionado na tabela 3.

**Tabela 03 - Ensaio e normas utilizadas para caracterização de rochas ornamentais**

ENSAIO	NORMA
Tração na Flexão	ABNT NBR 12.763/92
Impacto de Corpo Duro	ABNT NBR 12.764/92
Dilatação Térmica Linear	ABNT NBR 12.765/92
Índices Físicos	ABNT NBR 12.766/92
Compressão Uniaxial	ABNT NBR 12.767/92
Análise Petrográfica	ABNT NBR 12.768/92
Congelamento e Degelo	ABNT NBR 12.769/92
Desgaste Abrasivo Amsler	ABNT NBR 12.042/92
Flexão	ASTM C 880/98
Velocidade de Propagação de Ondas	ASTM D 2845/95

Fonte: Frascá (2002)

Especificações para algumas rochas já foram normalizadas pela ASTM e foram revisadas e atualizadas no Brasil pela ABNT através da Norma NBR 15844:2010. Estas especificações são mostradas na tabela 4.

**Tabela 04 - Especificações ASTM para mármore, calcários, travertinos, arenitos e quartzitos**

NORMA	Rocha	Uso	$\rho$	AA	$\sigma_c$	$\sigma_{rf}$	$\sigma_f$
ASTM C 503	Calcita	Exterior	$\geq 2.595$	$\geq 0,20$	$\geq 52$	$\geq 7$	$\geq 7$
	Mármore		$\geq 2.800$				
	Dolomita						
ASTM C 568	Calcáreo	I – Baixa Densidade	$\geq 1.760$	$\geq 12$	$\geq 12$	$\geq 2,9$	n.e
		II – Média Densidade	$\geq 2.160$	$\geq 7,5$	$\geq 28$	$\geq 3,4$	
		III – Alta Densidade	$\geq 2.560$	$\geq 3$	$\geq 55$	$\geq 6,9$	
ASTM C 1527	Travertino	I - Exterior	$\geq 2.305$	$\geq 2,5$	$\geq 52$	$\geq 6,9$	$\geq 6,9$
		II - Interior			$\geq 54,5$	$\geq 4,8$	$\geq 4,8$
ASTM C 616	Arenito	I – Arenito ( $\geq 60\%$ sílica livre)	$\geq 2.003$	$\geq 8$	$\geq 27,6$	$\geq 2,4$	n.e.
		II – Arenito quartzítico ( $\geq 90\%$ sílica livre)	$\geq 2.400$	$\geq 3$	$\geq 68,9$	$\geq 6,9$	
		III – Quartzito ( $\geq 95\%$ sílica livre)	$\geq 2.560$	$\geq 1$	$\geq 137,9$	$\geq 13,9$	

$\rho$ : Densidade aparente [ $kg/m^3$ ]; AA: Absorção d'água [%];  $\sigma_c$ : Resistência à compressão uniaxial [MPa];  $\sigma_{rf}$ : Resistência à tração na flexão [MPa];  $\sigma_f$ : Resistência à flexão [MPa]; n.e.: Não especificado.

Fonte: Adaptado de Frascá (2011, apud Alencar, 2013)

As propriedades físicas e mecânicas dos arenitos, bem como a sua composição, direta ou indiretamente têm influência no comportamento desta rocha no processamento por usinagem, e por isso a importância em se conhecer estas propriedades.

## 2.2 USINAGEM / FRESAMENTO

Segundo Ferraresi (1970), operações de usinagem são aquelas que, ao conferir à peça, a forma, ou as dimensões ou o acabamento ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Para Santos e Sales (2007), processo de usinagem é a transformação da matéria prima em produto por meio da remoção de material em forma de cavacos. Dessa mesma forma definem usinagem Stoeterau (2004) e Machado et al. (2011). Cavaco é a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular (FERRARESI, 1970).

Os processos de usinagem são classificados em três categorias:

- Processos de usinagem com ferramenta de geometria definida: torneamento, fresamento, furação, brochamento, rosqueamento, alargamento, aplainamento, mandrilamento e outros.
- Processos de usinagem com ferramenta de geometria não definida: retificação, brunimento, polimento, jateamento, tamboreamento, lapidação, lixamento e outros.
- Processos de usinagem não convencionais: remoção térmica, remoção química, remoção eletroquímica, remoção por jato d'água, remoção por ultrassom e outros.

Cada um dos processos de usinagem mencionados apresenta suas particularidades e suas aplicações específicas. Aqui será abordado com maiores detalhes o processo de fresamento, pela sua aplicação neste trabalho de pesquisa.

Segundo Ferraresi (1970), fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas, geralmente, multicortantes. No processo de fresamento, a operação de corte é feita pela ferramenta (fresa), que tem movimento de rotação. O movimento de avanço é geralmente feito pela peça em usinagem, que está presa sobre a mesa da máquina, e obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe confere a forma e



dimensão desejadas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013). Também existem fresadoras e centros de usinagem em que a peça fica parada e os demais movimentos são efetuados pela ferramenta. Um exemplo deste caso é a fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D, disponível no LdSM - UFRGS.

Os principais parâmetros de usinagem envolvidos no fresamento (figura 8) são velocidade de corte ( $V_c$ ), velocidade de avanço ( $V_f$ ), profundidade de usinagem ( $a_p$ ) e penetração de trabalho ( $a_e$ ). Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), estes são os principais fatores que devem ser levados em conta na seleção das condições de usinagem no fresamento e do número de dentes da fresa.

Velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e o sentido de corte (FERRARESI, 1970). No caso do fresamento, entram em ação duas variáveis: o diâmetro da fresa e a rotação da mesma (velocidade angular). A velocidade de corte é dada pela equação 2:

$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \quad (\text{Eq. 2})$$

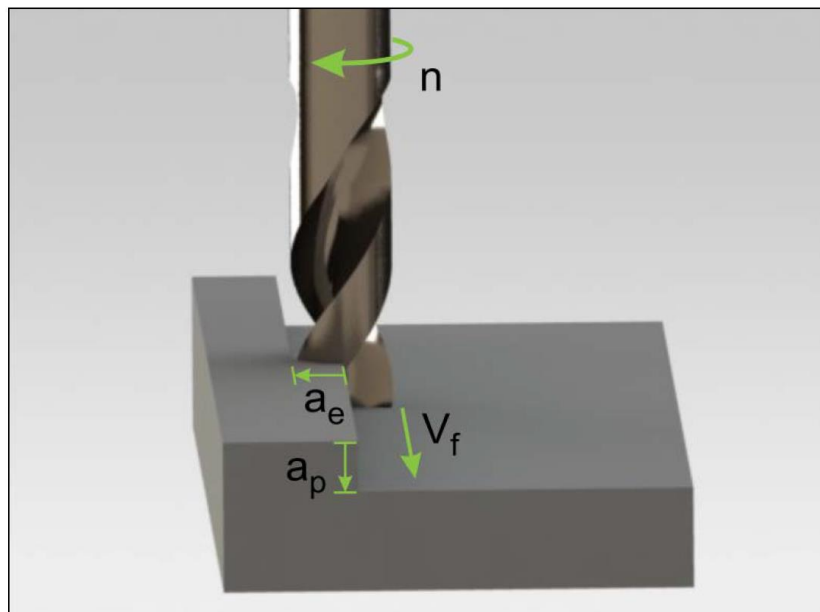
Onde:

$V_c$  = Velocidade de corte [m/min]

$D$  = diâmetro da fresa [mm]

$n$  = número de rotações da fresa, por minuto [rpm]

**Figura 08 - Parâmetros de usinagem no fresamento: velocidade de rotação ( $n$ ), velocidade de avanço ( $V_f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e penetração de trabalho ( $a_e$ )**

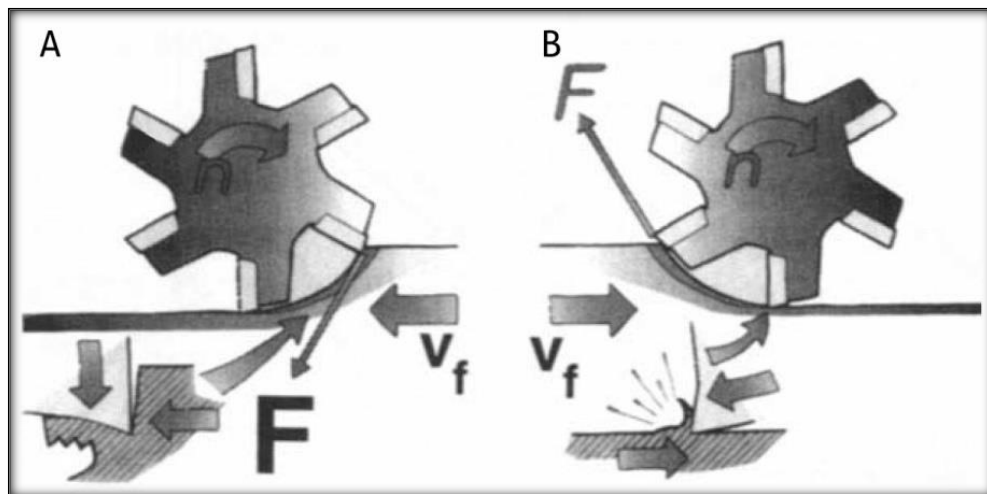


Fonte: Silva (2011)

A profundidade de corte e a penetração de trabalho são variáveis de profundidade, isto é, indicam quanto a fresa penetra na peça, por passe. Uma é medida no eixo z (vertical) e a outra, no eixo x ou y (lateral), perpendicular à direção do corte, em mm. É denominada profundidade de corte a medida no eixo z e penetração de trabalho a medida no eixo x ou y, dependendo da direção do corte.

O fresamento, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) pode ser discordante ou concordante. Fresamento discordante é aquele em que a direção do movimento de avanço e o movimento de corte são contrários. Neste tipo de processo, a formação do cavaco tem espessura zero no início do corte e espessura máxima no final do corte. Fresamento concordante é aquele em que a direção do movimento de avanço e o movimento de corte estão na mesma direção. Neste tipo de processo, a formação do cavaco tem espessura máxima no início do corte e espessura zero no final do corte. A figura 9 apresenta esquematicamente estes dois tipos de fresamento.

**Figura 09 - Fresamento concordante (A) e discordante (B)**



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2013)

O processo de fresamento pode ser manual ou programável. Quando ele é manual existe um operador que tem participação direta nos movimentos de avanço e profundidade de corte. Quando o processo é programável estes movimentos são controlados por computador e o processo é chamado fresamento CNC (Comando numérico computadorizado). Na usinagem CNC faz-se a entrada de dados no computador e este, através de softwares CAD/CAM (desenho assistido por computador e manufatura assistida por computador), processa os movimentos da máquina nos eixos x, y e z necessários à obtenção da forma desejada. A usinagem

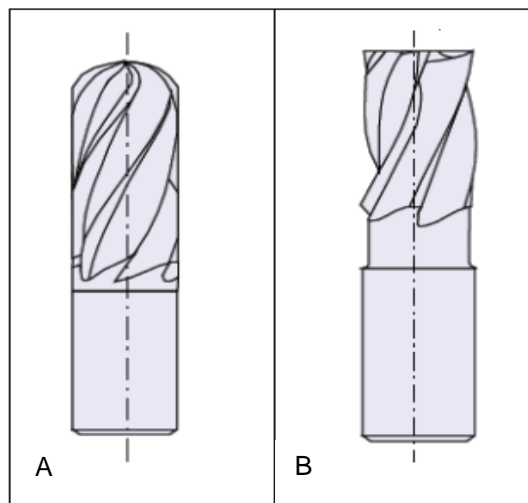
CNC representa um avanço muito grande na indústria, principalmente no que se refere à obtenção de formas complexas, repetitividade, qualidade e intercambiabilidade.

### 2.2.1 Ferramentas utilizadas no fresamento: Fresas

Em função do tipo de superfície a ser obtida, é selecionada a geometria da fresa a ser usada. Para atender estas necessidades, fabricantes de ferramentas criaram muitos tipos de fresas e disponibilizaram no mercado.

Entre os principais tipos de fresas estão as fresas de topo. Estas fresas são muito versáteis, pois apresentam arestas de corte tanto na periferia como na parte frontal, podendo executar vários tipos de operações de fresamento, como facear, ranhurar, executar bolsões, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos e fresar contornos. Geralmente, a ponta dessas fresas de topo é reta ou esférica. Estas ferramentas são muito usadas na usinagem de modelos, moldes, e em peças com superfícies de geometrias complexas. São fresas de pequeno diâmetro, geralmente inferior a 20 mm. A figura 10 ilustra estes tipos de fresa.

**Figura 10 - Fresas de topo de ponta esférica (A) e ponta reta (B)**



Fonte: Adaptado de Stoeterau (2004)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), uma série de fatores devem ser ponderados para a seleção criteriosa do material da ferramenta, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz (potência, gama de velocidades, estado de conservação, etc.), forma e dimensões da ferramenta, custo do material da

ferramenta, condições da usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e condições da operação (corte interrompido, fixação da peça e etc.).

Para Santos e Sales (2007), as propriedades requeridas por uma ferramenta de corte ideal são: elevada dureza, resistência ao desgaste, à compressão e ao cisalhamento, tenacidade, boa condutividade térmica, baixo coeficiente de expansão volumétrica e elevada inércia química. Conforme Machado et al. (2011), o material de ferramenta ideal deveria ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço rápido e a inércia química da alumina, porém, tal material ainda não existe. A dificuldade de reunir estas propriedades em um só material é que justifica a existência de uma variedade de materiais para ferramentas de corte (SANTOS E SALES, 2007).

Com relação à dureza, o material utilizado em uma ferramenta de usinagem deve ser mais duro que o material que ela deve usinar. O material mais duro encontrado na natureza é o diamante, muito utilizado em ferramentas para corte de rochas, principalmente em serras. Segundo Konstanty (2005), as aplicações modernas de ferramentas de diamante têm mais ou menos um século de idade, embora o uso do diamante como uma ferramenta de gravação remonta a 350 aC.

Kindlein Junior (1999) salienta que um somatório de propriedades mecânicas, como dureza, resistência ao desgaste, resistência à compressão e baixo coeficiente de atrito, confere ao diamante uma posição de destaque como grão abrasivo. A tabela 5 compara o valor de dureza do diamante com alguns outros materiais considerados duros.

**Tabela 05 - Comparação da dureza do diamante com alguns materiais considerados duros**

<b>Material</b>	<b>Dureza Knoop (GPa)</b>	<b>Dureza na escala de Mohs</b>
Diamante	70	10
Nitreto de boro cúbico	47	-
Carbeto de boro	28	-
Carbeto de silício	25	-
Óxido de alumínio	20	-
Metal duro	16	-
Quartzo	10	7

Fonte: Adaptado de Kindlein Junior (1999)

Atualmente, em função da produção de diamantes sintéticos, o mercado pode oferecer muitas variações de diamantes, tanto em formas como em tamanhos e propriedades. Em função da aplicação como ferramenta de corte, tanto a forma quanto o tamanho dos grãos de diamante são importantes. Segundo Konstanty (2005), Polini e Turchetta (2003), a regra básica para a seleção do diamante é selecionar o diamante mais forte para a rocha mais dura. O mercado oferece tanto diamantes naturais quanto sintéticos. Os diamantes naturais conservam sua resistência mecânica original até temperaturas da ordem de 1400°C, enquanto que os sintéticos já começam a perder suas propriedades por volta dos 800°C. Os diamantes com superfícies irregulares apresentam menor resistência mecânica, sendo indicados para o corte de rochas mais macias como o mármore. Já os diamantes de formas arredondadas apresentam maior resistência mecânica, porém exigem maior esforço de corte da máquina de usinagem. A principal vantagem da utilização de diamante sintético é que ele pode ser concebido e fabricado para satisfazer praticamente todos os requisitos de aplicações específicas (KONSTANTY, 2005).

Nota-se que, além da resistência mecânica, a forma do grão de diamante também tem grande importância. A morfologia do cristal ideal de diamante sintético pode variar a partir de um cubo puro para um octaedro puro. Os diamantes que têm forma de um cubo-octaédrico regular são mais resistentes do que os cristais irregulares com bordas menos bem definidas e ásperas.

Baseado no tamanho, os grãos de diamante comercialmente disponíveis, tanto sintéticos como naturais, são classificados em duas amplas faixas e são comumente referidos como grãos de “Serra” e “Roda” (KONSTANTY, 2005).

Os abrasivos de diamante referidos como de Serra são os de tamanho maior que 80 US mesh<sup>7</sup> e tem ampla aplicação numa variedade de operações de serrar, furar e fresar, onde as taxas de remoção de material rápido são essenciais. As orientações gerais, segundo Konstanty (2005), para aplicações mais comuns das ferramentas diamantadas em função do tamanho dos grãos de diamante utilizados estão especificadas na tabela 6.

---

<sup>7</sup> 80 US mesh refere-se a um tamanho de grão classificado por peneira que possui 80 aberturas por polegada linear. Na tabela 2 (pág.38) pode ser vista esta classificação onde se pode ver que malha 80 corresponde a um tamanho de grão de 0,177 mm.

**Tabela 06 - Orientações para aplicação das ferramentas diamantadas em função do tamanho dos grãos do diamante**

Tamanho dos grãos (US mesh)	Aplicações
20/30	Serramento com serra circular e perfuração de arenito muito abrasivo, concreto fresco e asfalto; perfuração de concreto armado; serramento de arenito abrasivo com serra de quadro (serra de lâmina reta com movimento alternativo de vai e vem).
30/40	Serramento com serra circular e perfuração de rochas, cimento, concreto armado e asfalto; serramento de arenito com serra de quadro.
40/50	Serramento com serra circular, perfuração e fresamento de rochas (por exemplo, granito, diorito, gabro, arenito menos abrasivo, calcário, dolomita, mármore), concretos e refratários; fio de corte de rocha e materiais de construção; calibragem de lajes de pedra.
50/60	Serramento com serra circular e perfuração de rochas ígneas de grãos muito duros e finos (por exemplo, granito, granodiorito) e refratários; serramento com serra circular, com serra de quadro e perfuração de rochas sedimentares de granulação fina e rochas metamórficas (por exemplo, calcário, mármore); calibragem de lajes de pedra.
60/80	Serramento com serra circular, perfuração e fresamento de vidro; calibragem de telhas de cerâmica.

Fonte: Adaptado de Konstanty (2005)

Há uma tendência geral para aplicar grãos mais finos para operações de serragem secundárias lentas, onde o acabamento da superfície e a definição da borda são questões de grande preocupação. Em geral, os grãos mais finos sendo relativamente mais fortes, também são recomendados para serrar materiais mais duros e mais difíceis de cortar (KONSTANTY, 2005).

A principal vantagem da utilização de grão grosseiro é um maior potencial para o corte mais rápido, isto porque um grão grosso alcança saliências mais elevadas, e, portanto, produz uma maior folga, e permite a fácil expulsão de aparas, quando um maior volume de material da peça de trabalho tem de ser removida por rotação da ferramenta. No entanto, se o grão muito grosseiro é usado em materiais muito duros, a penetração de cada partícula é limitada e, assim, ocorre retirada excessiva ou grandes áreas de desgaste aparecem nos diamantes. Grãos de diamante mais finos do que 80 US mesh caem na classificação de Roda e são geralmente usados em operações de usinagem por abrasão. A maioria dos produtos

comerciais está disponível em um conjunto completo de nove tamanhos de grãos, de 80/100 até 325/400 US mesh (KONSTANTY,2005).

Segundo Santos (2004), as ferramentas diamantadas podem ser divididas genericamente em duas categorias: os abrasivos, cuja característica é a ausência de uma geometria definida de corte, e as ferramentas de geometria definida, onde se empregam os monocristais de diamante e insertos de compactos de diamante policristalino (PCD).

O PCD surgiu no início dos anos 70 como uma importante alternativa para usinagem de materiais duros e abrasivos. Segundo Heath (2001) e Konstanty (2002), PCD consiste de uma camada de pós finos de diamante sinterizados com uma fase ligante, metálica ou não metálica, em uma massa uniforme densa com cerca de 0,5 a 0,7 mm de espessura, apoiada sobre um substrato de metal duro. Este processo é caro e tecnicamente difícil, pois é feito em temperatura e pressão elevadas, entre 1200 e 1600°C e pressão da ordem de 6 GPa.

Segundo Heath (2001), ao longo dos anos houve uma evolução no processo de fabricação do PCD, sendo agora possível fabricar discos com até 74 mm de diâmetro. O disco é então cortado na forma desejada e soldado por brasagem sobre uma pastilha de metal duro. Uma importante vantagem do uso da ferramenta de PCD, segundo Tillmann (2000), é que o material é isotrópico, isto é, não apresenta a dependência da orientação da clivagem do cristal como no caso do diamante monocristalino. Villanueva (2003) cita como segunda vantagem do PCD, o fato de poder ser produzido em blocos relativamente grandes. Segundo este autor, as limitações na fabricação do PCD são o tamanho das câmaras de reação necessárias para a sinterização sob alta pressão.

As principais aplicações do PCD são brocas para perfuração de rochas, usinagem de painéis de derivados de madeira, compósitos de fibra de vidro ou ferramenta para produzir um acabamento fino em ligas de alumínio na indústria automotiva. Este material não pode ser usado na usinagem de materiais ferrosos devido à afinidade do carbono com o ferro. Também não pode ser usado em temperaturas superiores a 900 °C devido à grafitação do diamante. Na figura 11 pode ser vista uma fresa de PCD de ponta esférica de 6 mm de diâmetro, utilizada neste trabalho, observando que o PCD é apenas uma pequena parte (parte cortante) soldada na ponta do corpo da ferramenta que é de metal duro.

**Figura 11 - Fresa de PCD, Wirutex, de ponta esférica de 6 mm de diâmetro, utilizada neste trabalho**



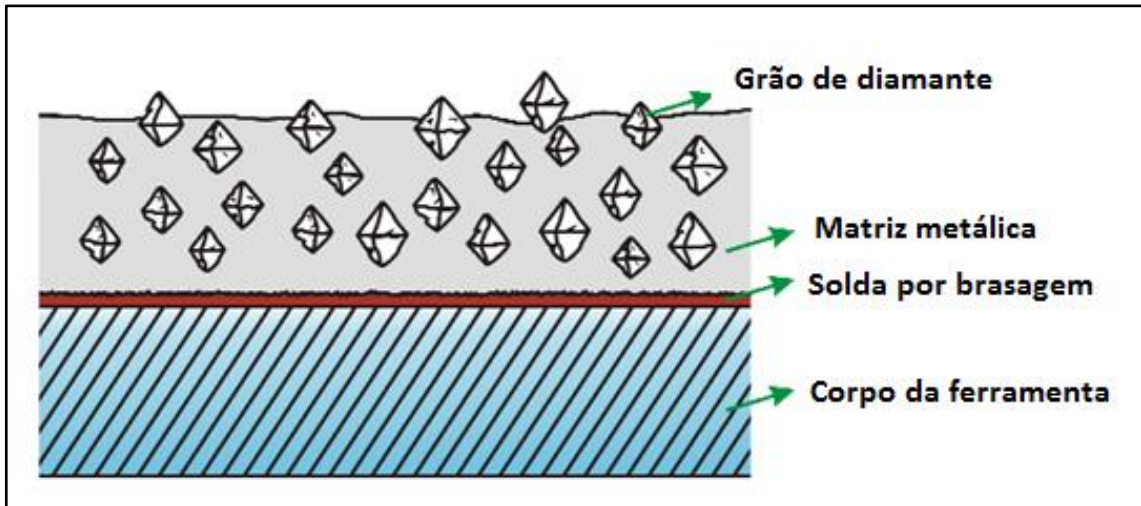
No segmento das ferramentas de diamante de geometria não definida, que trabalham por abrasão, existem vários tipos, em função do processo de fabricação e de sua aplicação. Entre elas estão as ferramentas de corte à base de diamantes impregnados em matriz metálica ligante, produzidas pelo processo de sinterização e as ferramentas diamantadas por eletrodeposição.

As do primeiro tipo, segundo Carvalho (2014), são compósitos constituídos de partículas de diamantes embebidos numa matriz metálica ligante, sendo produzidas em grande escala nas indústrias pelas técnicas da metalurgia do pó. O metal mais utilizado como matriz é o cobalto, pois além de conseguir bom ancoramento dos grãos de diamante, na maioria dos casos pode ser sinterizado com pressões na faixa de 30-35 MPa e temperaturas na faixa de 700 a 900°C (KONSTANTY, 2005). Esse tipo de ferramentas tem grande aplicação no beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente mármore e granito. Elas são usadas geralmente em serras de disco diamantadas para o corte de rochas, em brocas para furação e em fresas para perfilamento de bordas. As concentrações usuais de diamante, nestes compósitos, segundo Carvalho (2014), variam de 6 a 38 %, em volume. Essas ferramentas apresentam a vantagem de poder utilizar tamanhos variados de grãos de diamante, conforme a necessidade ou aplicação das mesmas. A figura 12 mostra de forma esquemática a distribuição dos grãos de diamante numa ferramenta obtida por esta técnica. Na figura 13 pode ser vista uma broca diamantada para furação de mármore e granito, onde se nota na ponta a parte cortante composta de grãos de



diamante sinterizados numa matriz metálica, a qual é soldada por brasagem no corpo da ferramenta que é feito de aço.

**Figura 12 - Vista esquemática de uma ferramenta de composto de diamante embebido em matriz metálica ligante**



Fonte: Adaptado de Reichenbacher (2010)

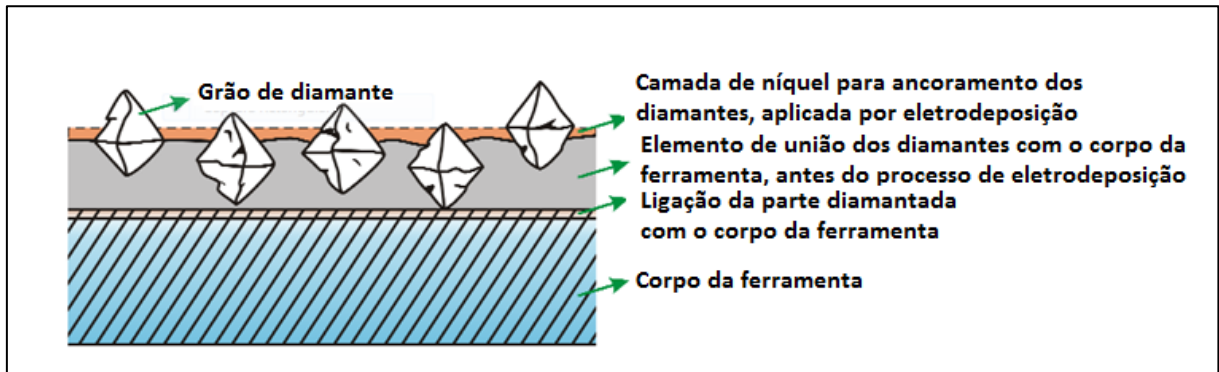
**Figura 13 - Broca para furação de mármore e granito de 10 mm de diâmetro de composto de diamante embebido em matriz metálica ligante, utilizada neste trabalho**



As ferramentas diamantadas por eletrodeposição apresentam uma camada muito fina de grãos de diamante, aplicados apenas em sua superfície. Os grãos de diamante são fixados na ferramenta por um processo galvânico, que utiliza uma liga de níquel para este fim. Se por um lado a camada depositada é fina, por outro lado existe a possibilidade de fazer nova deposição após o desgaste. A figura 14 mostra

de forma esquemática a distribuição dos grãos de diamante numa ferramenta obtida por esta técnica e na figura 15 pode ser vista uma ferramenta diamantada por eletrodeposição.

**Figura 14 - Vista esquemática de uma ferramenta diamantada por eletrodeposição**



Fonte: Adaptado de Reichenbacher (2010)

**Figura 15 - Ferramenta diamantada por eletrodeposição de 10 mm de diâmetro Master Diamond PMD100/D126<sup>8</sup>, utilizada neste trabalho**





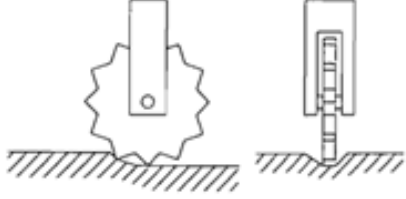
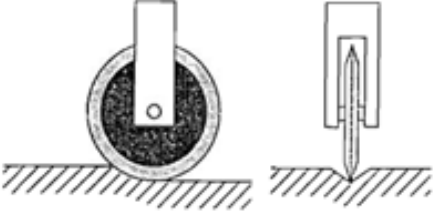
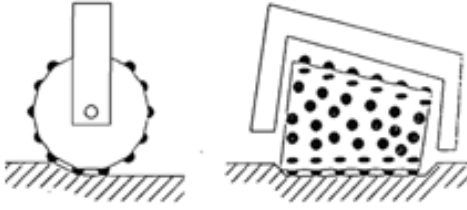
<sup>8</sup> D126 se refere à granulação do diamante conforme norma europeia FEPA. Esta especificação da norma FEPA equivale a grão de diamante de 120 a 140 pela norma americana US Mesh.

### 2.2.2 Usinagem de Rochas

Na revisão bibliográfica notou-se uma carência de publicações específicas sobre usinagem de rochas por fresamento. O que foi encontrado são assuntos semelhantes, que permitiram fazer algumas associações e usar como ponto de partida para o início da parte experimental desta pesquisa.

No segmento de escavação de rochas, Guo (1990) mostra uma revisão dos estudos sobre a teoria do corte de rochas com base na observação do mecanismo de fratura devido ao corte por diferentes ferramentas. A figura 16 apresenta as formas básicas destas ferramentas e suas aplicações.

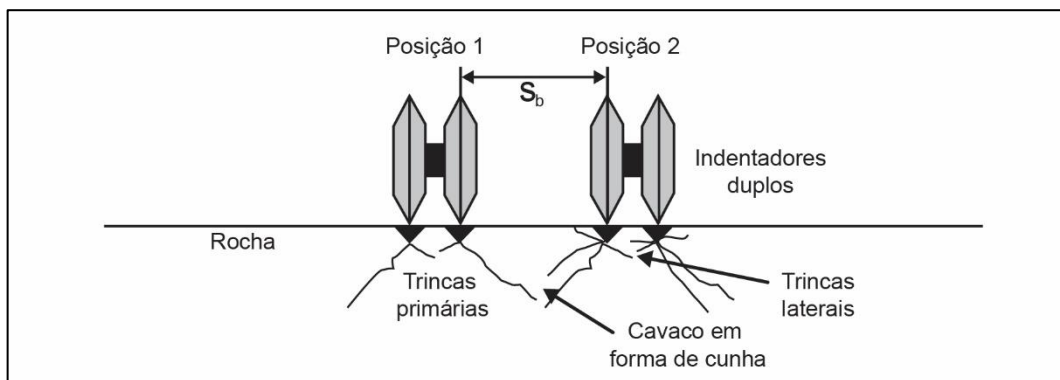
**Figura 16 - Tipos de ferramentas usadas para cortar rochas**

Tipo de Ferramenta	Diagrama Esquemático	
Cunha de Arraste (Drag Pick)	Tipo Cizel	
	Tipo Cone	
Rolo Dentado (Toothed Roller)		
Cortador de Disco (Disc Cutter)		
Rolo de Botões (Button Cutter)		

Fonte: Adaptado de Guo (1990)

O autor estudou a mecânica da fratura da rocha com atenção no mecanismo de formação das trincas, suas direções e formas. Ele estudou a formação de trincas devido ao corte por ferramenta tipo cunha de arraste e por indentadores e, com base em seu estudo, sugeriu um sistema híbrido de corte de rochas que combina corte por indentadores duplos e ferramenta de corte tipo cunha de arraste, onde primeiramente os indentadores duplos produzem a trinca e a formação do cavaco e, a seguir, a ferramenta tipo cunha de arraste remove os cavacos, conforme mostra-se nas figuras 17 e 18. A distância correta entre os passes dos indentadores ( $S_b$ ) é fator determinante para o sucesso da operação.

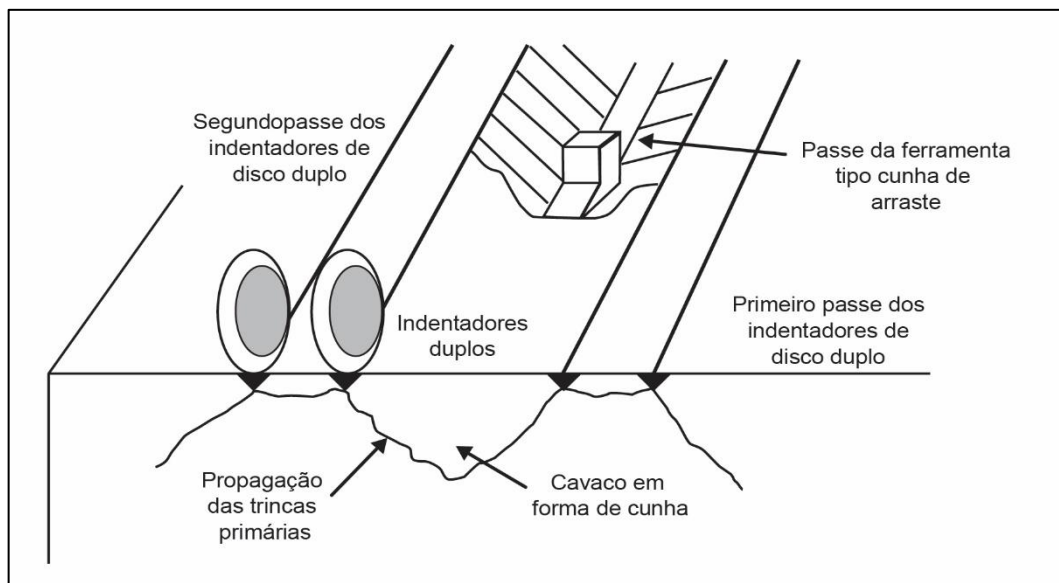
**Figura 17 - Formação de cavaco em forma de cunha através da propagação de trincas com a utilização de dois pares de indentadores**



$S_b$  = distância entre indentadores

Fonte: Adaptado de Guo (1990)

**Figura 18 - Sistema de corte combinando indentadores duplos com ferramenta tipo cunha de arraste (Drag Pik)**



Fonte: Adaptado de Guo (1990)

Guo (1990) utilizou um modelo numérico para avaliar a tenacidade à fratura a partir das trincas e comparou os resultados obtidos com resultados experimentais pelo ensaio de compressão uniaxial, ensaio Brasileiro (ensaio de tração indireta) e pelo ensaio de flexão Chevron. O ensaio Brasileiro foi usado para avaliação da tenacidade à fratura de seis tipos de rochas, e os resultados foram comparados com os obtidos pelo ensaio de flexão Chevron com boa equivalência. Assim, o autor sugere o ensaio brasileiro para uso em campo, pois é um ensaio fácil de realizar, não exige equipamentos complexos e a preparação das amostras é simples.

Também foram feitos ensaios de furação com ferramentas diamantadas com o objetivo de medir taxa de penetração da ferramenta e comparar com os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura. O estudo do comportamento das trincas envolvidas no processo de corte da rocha sugere que a tenacidade à fratura, uma importante propriedade intrínseca da rocha, pode estar estreitamente relacionada com o desempenho de corte e furação da rocha.

Pode-se notar que existe uma tendência entre as taxas de penetração das máquinas de perfuração e corte e os resultados das medições da tenacidade à fratura, pelos métodos descritos. A taxa de penetração diminui à medida que a tenacidade à fratura aumenta. Entretanto, para Guo (1990), a tenacidade à fratura não é o único indicador do desempenho de furação de rochas. A dureza da rocha também é uma propriedade importante que deve ser incorporada como indicador do desempenho em sua furação.

Yarali et al. (2008) estudaram a relação do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI) com o objetivo de estimar o desgaste de ferramentas de mineração. Os autores mediram o CAI de 29 rochas sedimentares e analisaram as relações com a quantidade de quartzo equivalente presente na rocha, tamanho dos grãos, tipo de cimento e grau de cimentação da rocha. Segundo os autores, a resistência de uma ferramenta ao desgaste, quando em contato com a rocha, é o princípio mais comum para medir a abrasividade da rocha. O ensaio do Índice Abrasividade Cerchar é baseado neste princípio, e é recomendado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM,1978) como um método de testes mecânicos de rochas. A medição do CAI ganhou popularidade como um método conveniente e relativamente barato para medir abrasividade de rochas.

O Índice de Abrasividade Cerchar varia de 0,3 a 6 sendo 0,3 rocha não muito abrasiva e 6, rocha extremamente abrasiva. A tabela 7 mostra esta classificação.

**Tabela 07 - Classificação do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI)**

<b>CAI</b>	<b>Abrasividade da Rocha</b>
0,3 – 0,5	Não muito abrasiva
0,5 – 1,0	Ligeiramente abrasiva
1,0 – 2,0	Média abrasividade para abrasiva
2,0 – 4,0	Muito abrasiva
4,0 – 6,0	Extremamente abrasiva

Fonte: Adaptado de Yaralı et al. (2008)

Segundo os autores, a abrasividade da rocha tem forte dependência da quantidade de quartzo, do tamanho dos grãos de quartzo, do tipo de cimento e do grau de cimentação. Existe uma relação linear entre o CAI e a quantidade de materiais abrasivos contidos na rocha. As conclusões mais importantes do estudo são a relação linear entre CAI e consumo de ferramentas. Isto mostra que o aumento da quantidade de quartzo e outros minerais abrasivos no conteúdo da rocha, tamanho médio de grão e cimentação têm impacto direto sobre o consumo de ferramentas.

Em função da indústria dedicada à produção de rochas ornamentais, na maioria mármore e granito, muitas ferramentas diamantadas para corte, usinagem plana e perfilamento de bordas foram desenvolvidas, mas no que se refere a ferramentas diamantadas para usinagem, nos moldes das utilizadas na indústria metalúrgica, o mercado ainda é muito carente.

Ferramentas utilizando diamantes ligados por matriz metálica foram introduzidas no segmento de corte de pedras naturais e na engenharia civil, há décadas e, sem dúvida, revolucionaram o setor devido às altas taxas de remoção de material. Embora significantes avanços tenham sido feitos em termos de melhoria nas ferramentas de diamante, a relação custo-benefício merece estudo (TÖNSHOFF, HILLMANN-APMANN e ASCHE, 2002).

Segundo Konstanty (2002), a produção de lâminas de serras e brocas para o corte de pedras e aplicações na indústria da construção foi identificado como o maior segmento de consumo total de diamantes industriais da Europa,

representando 61% deste consumo. Tönshoff, Hillmann-Apmann e Asche (2002), salientam que no segmento de corte de pedras naturais e na engenharia civil o processo com a utilização de serras de disco diamantadas é o mais difundido.

A indústria italiana Breton (Breton, 2004) é uma importante fabricante de máquinas de usinagem para rochas, inclusive centros de usinagem de cinco eixos dedicados à usinagem de mármore, granito e outras rochas com uso de tecnologias 3D. Em seus equipamentos, nas operações de desbaste, usam serra de disco como ferramenta de corte (figura 19). A figura 20 mostra a operação final de usinagem, a qual é realizada com fresas.

**Figura 19 - Centro de Usinagem Breton de 5 eixos em operação de desbaste utilizando serra de disco como ferramenta de corte**



Fonte: <http://www.breton.it/fabshop>

**Figura 20 - Centro de Usinagem Breton de cinco eixos em operação de acabamento utilizando fresa**



Fonte: <http://www.breton.it/fabshop>

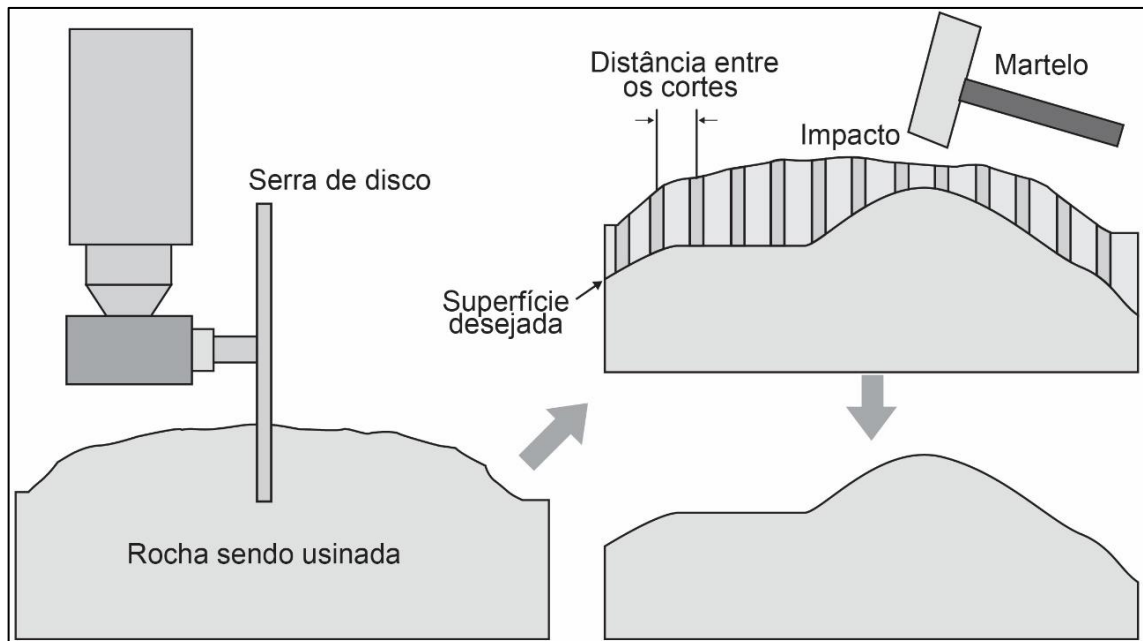
Procedimento de usinagem semelhante, com utilização de serra de disco como ferramenta de corte, foi apresentado por Campos et al. (2009). Os autores mostraram a usinagem de peças utilizadas na arquitetura num centro de usinagem de seis eixos utilizando serra de disco como ferramenta de corte. A proposta dos autores é a criação de um software auxiliar para o CAM existente. Esta proposta sugere o uso de sensores que ajudam o software a tomar decisões quanto aos parâmetros de usinagem, podendo modificá-los durante o processo de usinagem.

A figura 21 apresenta de forma esquemática o uso de serras de disco diamantadas como ferramentas de usinagem num centro de usinagem de seis eixos para obtenção de peças de rocha para arquitetura. Na primeira operação de desbaste, a serra de disco faz vários cortes paralelos com o perfil aproximado da peça final. Após esta operação ficam várias placas finas de material, no intervalo entre os cortes de serra, que são quebrados manualmente, através de impacto de martelo. Isto representa economia de custos com ferramentas de corte e tempo de



usinagem. Após esta etapa são feitas operações de usinagem para o acabamento. Na figura 22 pode ser visto um exemplo de peça final.

**Figura 21 - Esquema de seqüência de operações de usinagem de rochas num centro de usinagem de seis eixos utilizando serra de disco como ferramenta de usinagem**



Fonte: Adaptado de Campos et al. (2009)

**Figura 22 - Peça usinada**



Fonte: Campos et al. (2009)

As ferramentas diamantadas, mais especificamente as serras de disco, são compostas de um disco de aço temperado com sua periferia composta por segmentos diamantados soldados por brasagem ou por solda a laser (TÖNSHOFF, HILLMANN-APMANN e ASCHE, 2002). Os segmentos diamantados são compostos por grãos de diamante unidos por uma matriz metálica, geralmente cobalto e suas ligas. Esta matriz tem duas funções muito importantes, que são fixar os cristais de diamante com a força necessária para que não se desprendam durante o corte e, ao mesmo tempo se desgastar à medida que cristais de diamante vão perdendo a capacidade de corte, de modo que novos cristais fiquem salientes para efetuar o corte (KONSTANTY, 2005).

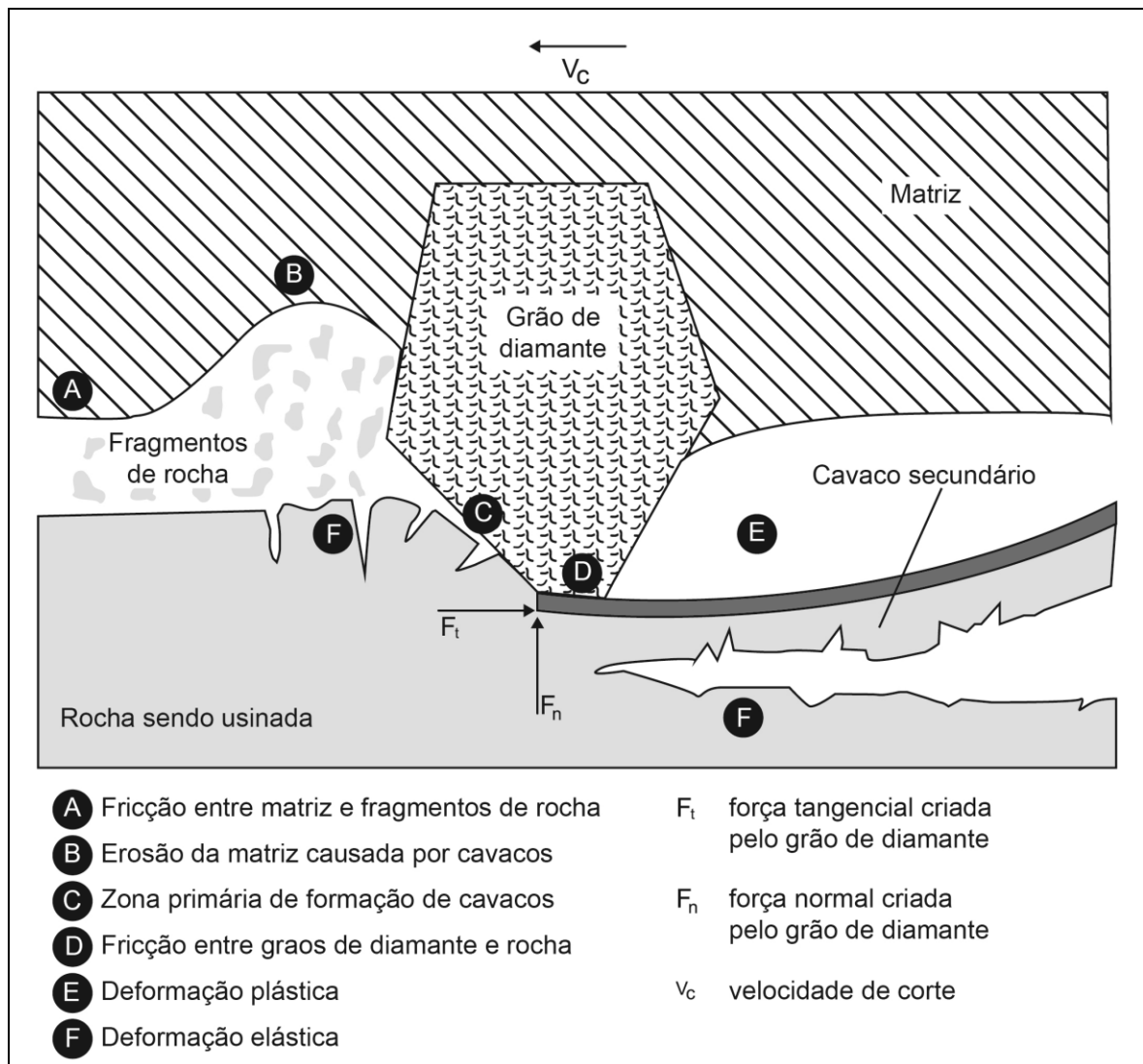
A escolha correta da matriz é fator determinante da vida de uma ferramenta diamantada, e é definida em função da abrasividade do material que será usinado por ela. Se por um lado a matriz for muito macia, comparada ao material a ser usinado, esta se desgastará rapidamente, perdendo os grãos de diamante precocemente. Porém, se por outro lado, a matriz for muito dura, ela terá dificuldade de se desgastar e, à medida que os grãos de diamante forem perdendo a capacidade de corte (geralmente por desgaste), os novos grãos não aparecerão, ocorrendo o atrito da matriz com a peça a ser usinada, gerando o fenômeno chamado vidramento da matriz, com conseqüente perda da capacidade de corte da ferramenta (KONSTANTY, 2002).

A interação entre ferramenta e peça durante o processo de corte por uma ferramenta diamantada tipo disco gera um sistema complexo de forças devido às deformações elásticas e plásticas da peça pela aresta de corte. Tais forças são oriundas da fricção entre peça e grão de diamante, fricção entre peça e matriz e fricção entre cavacos gerados e matriz. O processo de formação do corte de uma rocha, com uma ferramenta diamantada de geometria não definida, segundo Tönshoff, Hillmann-Apmann e Asche (2002), é dividido em dois mecanismos:

1. Na parte frontal do grão abrasivo são geradas tensões pelas forças tangenciais, e nesta zona são produzidos pequenos fragmentos da rocha devido a tensões de tração e compressão. Este mecanismo é chamado de formação primária de cavacos. Os cavacos são então forçados para fora através de sulcos na parte frontal e ao lado do grão de diamante.
2. Enquanto a rocha está sendo cortada pelo grão de diamante, sendo retirada pequena espessura de material, ela se apresenta sob tensões elásticas

extremas. O material na região sob o diamante é então submetido a tensões de compressão, e quando a carga é removida surge uma reversão elástica, elevando a tensão de tração até a tensão crítica gerando uma ruptura frágil. Este mecanismo produzido pela tensão de tração é chamado de formação secundária de cavacos, os quais são expulsos pelo fluxo do fluido refrigerante. A figura 23 apresenta, de forma esquemática, o mecanismo de corte da rocha e a formação dos cavacos com uso de ferramenta de geometria não definida.

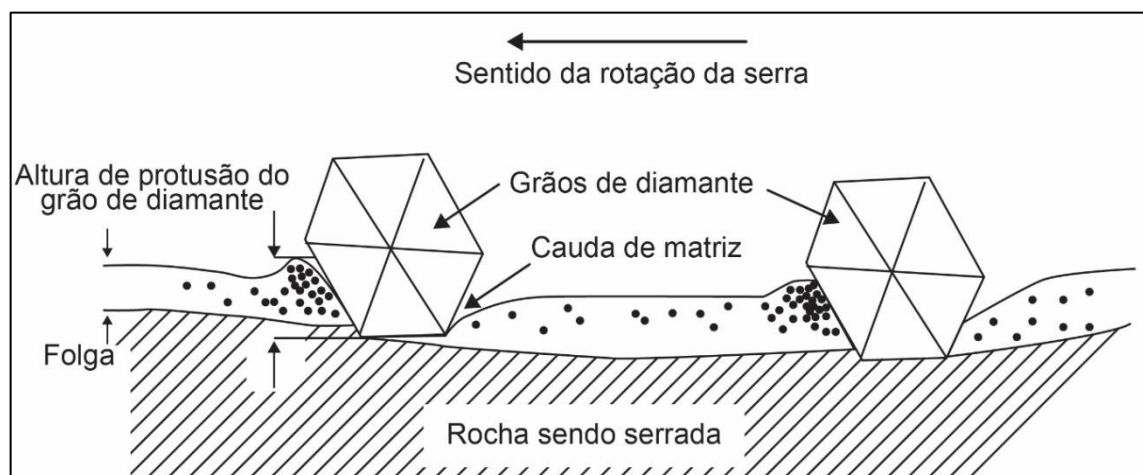
**Figura 23 - Interação mecânica entre ferramenta e rocha durante a operação de corte por serra de disco diamantada**



Fonte: Adaptado de Tönshoff, Hillmann-Apmann e Asche (2002)

Outro aspecto importante envolvido no mecanismo de corte de rochas com serra de disco diamantado é a formação de cauda de matriz, que é mostrada na figura 24. O movimento de rotação da serra num mesmo sentido com altas velocidades periféricas, geralmente entre 25 e 65 m/s, faz com que a matriz se desgaste somente na parte frontal do grão de diamante. Assim, na parte posterior dos grãos abrasivos, resta uma espécie de suporte, o qual dificulta a saída dos cavacos, formando uma lama que provoca desgaste prematuro da serra. Este problema não ocorre com as serras diamantadas de lâminas retas usadas nos teares multilâminas, pois estas têm movimento alternativo (vai e vem), o que evita a formação de cauda de matriz.

**Figura 24 - Representação esquemática da região de corte de uma serra de disco diamantada mostrando a formação de cauda de matriz**



Fonte: Adaptado de Konstanty (2005)

Com relação à teoria do corte com serra de disco diamantado e influência na vida da ferramenta, também deve ser analisado o sentido de rotação da serra combinado com seu sentido de deslocamento, o que gera um corte concordante ou discordante. No corte concordante, ou para baixo, a serra tende a puxar a rocha em sua direção, enquanto que no corte discordante, ou para cima, a serra tende a expulsar a rocha. A condição de corte que propicia maior vida para a serra é o corte discordante e foi comprovado para as condições e materiais estudados pelo autor (KONSTANTY, 2005).

Na tabela 8 são mostradas recomendações de velocidades periféricas para máquinas com serra diamantada de disco simples para corte de diversos tipos de rochas com uso de refrigeração por água.

**Tabela 08 - Recomendações de velocidades periféricas para máquinas de disco simples com refrigeração por água**

<b>Material</b>	<b>Velocidade Periférica da serra (m/s)</b>
Corte de vários materiais com equipamento portátil	80 - 100
Granito quartzoso	25 - 30
Granito com baixo quartzo	30 - 40
Mármore	40 - 50
Travertinos	45 - 60
Arenitos	40 - 65
Cerâmicas	20 - 50
Concreto	35 - 50
Concreto reforçado	30 - 40
Asfalto	40 - 60

Fonte: Adaptado de Konstany (2005)

Também, a título de referência, na tabela 9 são mostradas recomendações de velocidade periférica e taxas de avanço em operações de furação com brocas tubulares diamantadas.

**Tabela 09 - Recomendações de velocidade periférica e taxa de avanço para brocas diamantadas refrigeradas com água**

<b>Material</b>	<b>Velocidade Periférica da broca (m/s)</b>	<b>Taxa de avanço (cm/min)</b>
Cerâmicas muito duras e de corte difícil	1	1 - 2
Granito e arenitos de corte difícil	1 - 2	3 - 4
Vidro	1,5 - 2,5	3 - 4
Concreto e concreto reforçado	2 - 4	4 - 8
Mármore, travertino e calcário	3-5	5 - 10
Arenito e asfalto	6 - 8	10 - 20

Fonte: Adaptado de Konstany (2005)

Wagner (1971), utilizando a suposição de comportamento elástico da rocha baseado em modelo fotoelástico, descreve um modelo teórico de formação de cavacos para o corte de rochas. Segundo o autor, o processo de corte de rochas com ferramenta de corte de geometria definida ocorre como descrito a seguir.

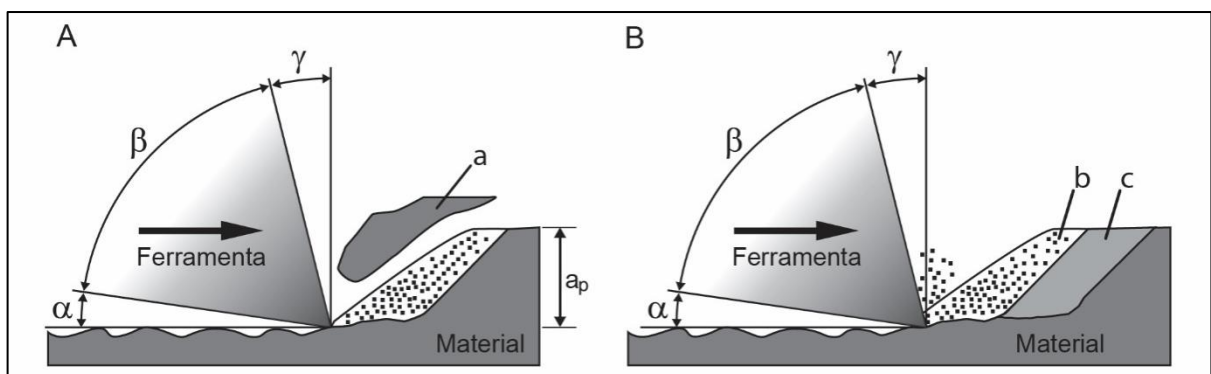
A descrição do processo começa logo após a retirada de um cavaco. Neste momento a aresta de corte da ferramenta é empurrada contra a rocha na direção do avanço, com certa profundidade de corte, e faz pequena penetração na rocha, gerando formação de pequenos cavacos, pois está usinando sobre a região onde saiu um cavaco grande.

Após a ferramenta passar esta região ela encontra mais material da rocha e tende a ser parada, mas como seu movimento é contínuo, começa a formação de tensões de compressão na região peça-ferramenta, afetando determinada área da rocha que mais tarde será um novo cavaco grande.

A tensão de compressão na rocha vai aumentando e ao mesmo tempo vai se formando um armazenamento de energia de deformação elástica na ferramenta. Como o movimento da ferramenta é contínuo, chega o momento em que a tensão de compressão se eleva a tal ponto que rompe a rocha lançando o cavaco fora por conta da energia elástica armazenada.

A ferramenta segue na direção do avanço até encontrar novamente material resistente da rocha e iniciar novo ciclo. Neste sentido, dois tipos de cavacos são gerados: cavacos pequenos no início do corte e um cavaco grande no término de cada ciclo de corte. A figura 25 mostra esquematicamente a formação dos cavacos.

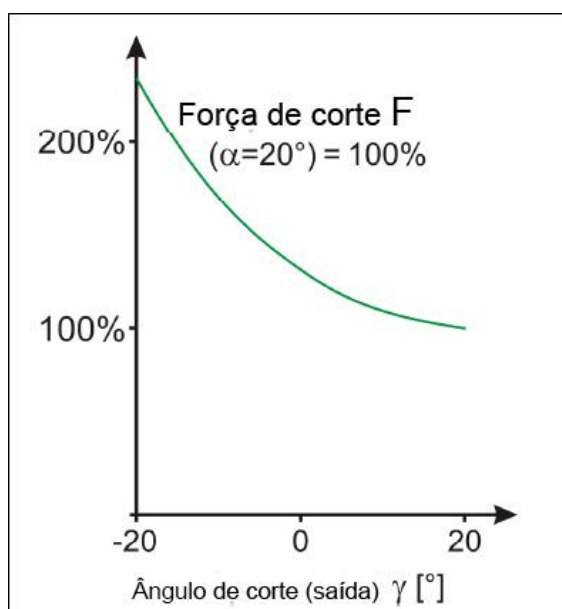
**Figura 25 – Representação esquemática dos diferentes cavacos formados durante o processo de corte da rocha com ferramenta de geometria definida**



**a:** Cavaco grande, **b:** Região de onde saiu um cavaco grande, **c:** Região sob tensões que será um novo cavaco, **a<sub>p</sub>:** Profundidade de corte, **α:** Ângulo de folga, **β:** Ângulo de cunha, **γ:** Ângulo de corte (ou de saída) da ferramenta

Ainda segundo seu modelo de formação de cavacos, Wagner (1971) afirma que o ângulo de formação da trinca que vai gerar o cavaco, em geral, independe do ângulo de saída ( $\gamma$ ) da ferramenta, mas que depende diretamente da direção da força de corte. Esta afirmação, segundo o autor, se baseia no conhecimento de que o ângulo de fratura de rochas para esforços de compressão pura permanece, em grande parte, constante. O ângulo  $\gamma$  tem grande influência na variação da força de corte. Uma variação de  $\gamma = 20^\circ$  para  $\gamma = -20^\circ$  resulta em um aumento desta força superior a duas vezes. A figura 26 mostra a curva teórica da variação desta força.

**Figura 26 – Variação da força de corte em função do ângulo  $\gamma$  da ferramenta**



Fonte: Adaptado de Reichenbächer (2010)

Reichenbächer (2010) estudou usinagem de rochas utilizando ferramenta de geometria definida. O autor ressalta que, embora a usinagem de metais há muito tem se afastado do corte com ferramentas de geometria indefinida, indo para o uso de ferramentas de geometria definida, no campo dos materiais minerais ainda são raras as alternativas que existem para a usinagem com ferramentas de geometria definida. Os processos de corte com serras de disco e com fio diamantado são todos com o princípio de corte por ferramentas de geometria não definida. O autor ainda comenta que existe pequeno número de publicações sobre o assunto e as poucas que existem, são, na maioria, teóricas.

O objetivo do trabalho de Reichenbächer (2010) foi apresentar um modelo de ferramenta de geometria definida, com alguns parâmetros iniciais para servirem como guia para a usinagem de materiais minerais. Para este estudo foi desenvolvido um equipamento de ensaios, o qual possui uma base para fixação do material a ser ensaiado, um mecanismo que permite ajustar a profundidade de corte e o ângulo de corte da ferramenta, e outro mecanismo que movimenta a ferramenta linearmente com velocidade que pode ser ajustada conforme necessidades do ensaio. Além disso, o equipamento tem instrumentação para medir força de avanço e de corte. O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte foi o desenvolvimento de uma ferramenta genérica de geometria definida para usinagem de materiais minerais, e a segunda foi um estudo sobre o corte e a formação de cavacos.

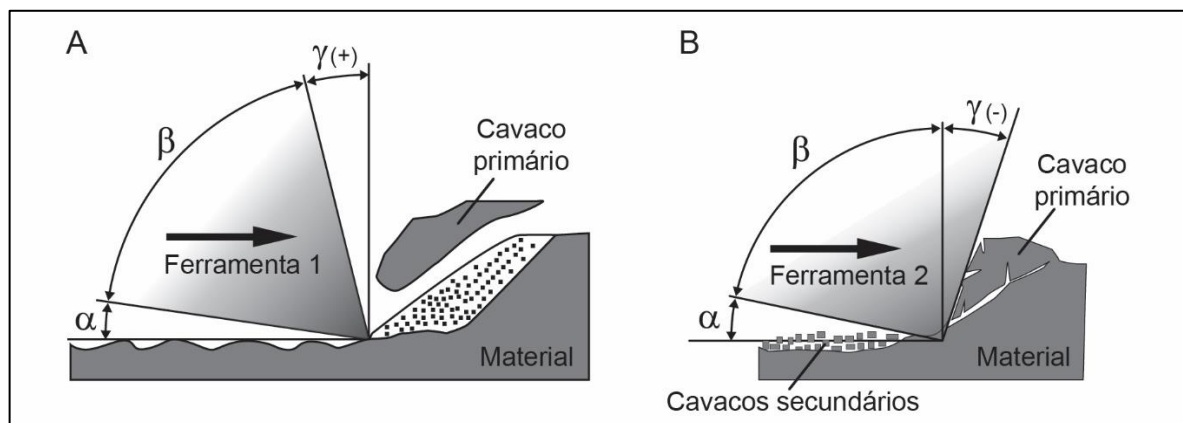
No estudo da ferramenta, Reichenbächer (2010) optou pela utilização de PCD como material da mesma. O autor avaliou cinco ferramentas de diferentes fabricantes e com diferentes tamanhos de grão (de 0,5  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$ ), com as quais fez ensaios de desgaste utilizando três tipos de granito, mármore e arenito. Também analisou forças de corte e avanço variando o ângulo de saída  $\gamma$ . As ferramentas avaliadas inicialmente foram construídas com forma semicircular de 25 mm de diâmetro com ângulo de cunha de 88°. Os ensaios foram feitos variando o ângulo de saída  $\gamma$ , que conseqüentemente fez variar o ângulo de folga  $\alpha$ , visto que o ângulo de cunha era fixo. O ângulo  $\gamma$  variou de 0° a -35° com intervalos de 5°. Os parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios foram  $V_c$  de 60 m/min e profundidades de corte de 30, 50, 70 e 100  $\mu\text{m}$ . Como as ferramentas tinham ângulos de cunha fixo de 88°, não foi possível fazer ensaios com ângulo de saída  $\gamma$  positivo.

Nesta primeira fase de ensaios o autor concluiu que as ferramentas com o menor tamanho de grão são mais resistentes ao desgaste do que as ferramentas com grão de diamante maior, pois o material de união dos grãos de diamante fica menos exposto e se desgasta menos, mantendo a união dos grãos de diamante, o que é fator determinante para a resistência ao desgaste deste tipo de ferramenta. Os ângulos de corte  $\gamma$  que proporcionaram as menores forças de corte e avanço ficaram entre -15° e -30°, sendo o menor valor com ângulo de -25°. Como o ângulo de cunha era fixo, utilizando ângulos de saída  $\gamma$  entre -15° e 0° o ângulo de folga  $\alpha$  fica muito pequeno, criando força contrária ao avanço da ferramenta.



Na segunda parte do estudo, o autor, baseado em Wagner (1971), estudou a formação de cavacos na usinagem de materiais minerais com ferramentas de geometria definida. Wagner (1971) em nenhum momento aborda a formação de cavacos secundários, já Reichenbächer (2010) trata da formação de cavacos secundários, os quais ele observou em seus experimentos. O autor infere que a origem dos cavacos secundários no corte com ferramenta de geometria definida está associada com ângulo de saída  $\gamma$  negativo e ângulo de folga  $\alpha$  muito pequeno. Para estas condições o corte com ferramenta de geometria definida se aproxima das condições do corte com ferramenta de geometria não definida, provocando a formação dos cavacos secundários. A formação de cavacos é diretamente dependente do ângulo de saída da ferramenta ( $\gamma$ ). Quanto mais negativo este ângulo for, mais se assemelha ao corte com ferramenta de geometria não definida, gerando uma tensão de compressão grande no material sob a ferramenta e, quando a ferramenta passa, essa tensão se inverte, dando a formação dos cavacos secundários. Na figura 27A mostra-se uma ferramenta de corte com ângulo de saída positivo, onde aparece apenas formação de cavacos primários. Já na figura 27B o ângulo de saída é negativo, então aparece a formação de cavacos primários e secundários.

**Figura 27 - Ferramenta com ângulo  $\gamma$  positivo (A) e negativo (B)**



Fonte: Adaptado de Reichenbächer (2010)

É importante observar que o tamanho dos cavacos da formação primária é bastante superior aos da formação secundária. Ainda, segundo o autor, o raio da aresta de corte da ferramenta, gerada pelo desgaste da mesma, também tem grande influência na formação de cavacos primários e secundários. Quanto menor for o raio da aresta de corte da ferramenta menor será a formação de cavacos

secundários, pois diminui a componente da força que gera as tensões de compressão sob a ferramenta e, conseqüentemente a inversão das tensões após o deslocamento da mesma.

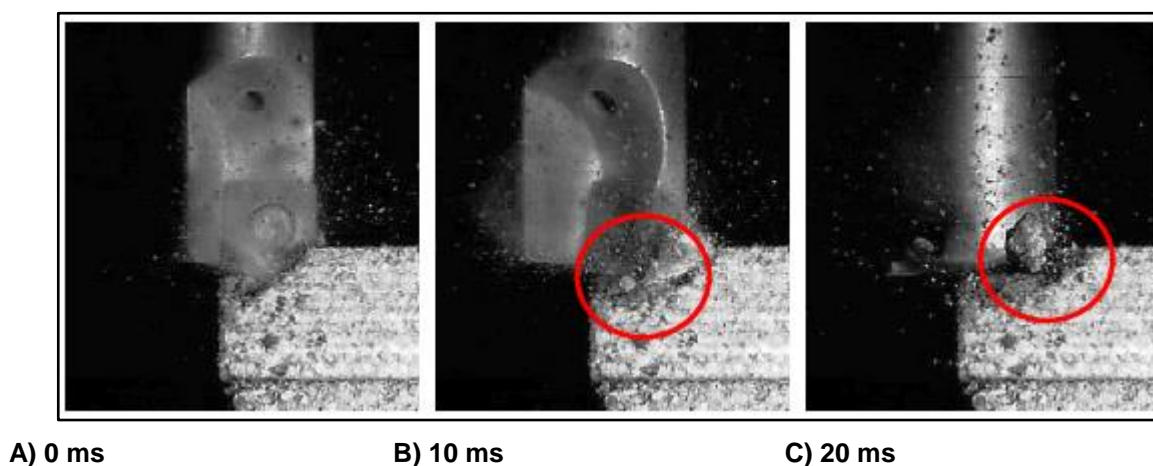
Segundo Reichenbächer (2010), a grande vantagem do corte com ferramenta de geometria definida sobre o corte com ferramenta de geometria não definida é o menor esforço de corte, com conseqüente economia de energia.

Uhlmann e Manthei (2015) trabalharam com pesquisas sobre usinagem de rochas naturais usando ferramentas de geometria definida. Os autores dizem que nos últimos anos existem muitas pesquisas sobre o processo de corte de rochas naturais, mas que a maioria dos trabalhos é sobre o uso de ferramentas de diamante que trabalham pelo processo de abrasão (ferramentas de geometria não definida). Conforme os autores, embora a maioria dos trabalhos de pesquisa tenha esta direção, existem também trabalhos que mostram que é possível usinar rochas naturais com a utilização de uma ferramenta de geometria definida com arestas de corte como as usadas na usinagem dos metais.

Uhlmann e Manthei (2015) fizeram experimentos com dois tipos distintos de rochas, Arenito de Posta (Alemanha) e Mármore de Carrara (Itália), utilizando uma fresadora de três eixos com ferramentas de corte de geometria definida (fresas de topo de 16 mm de diâmetro com uma aresta de corte). O objetivo da pesquisa era avaliar a influência dos parâmetros de usinagem no tamanho dos cavacos gerados e na rugosidade das superfícies usinadas. Os ensaios foram feitos com combinações de parâmetros de usinagem com a velocidade de corte ( $V_c$ ) variando de 53,78 a 134,62 m/min, o avanço por dente da fresa ( $f_z$ ) variando de 0,13 a 0,32 mm e a profundidade de corte ( $a_p$ ) variando de 0,86 a 2,14 mm. Foi utilizada uma câmera de alta velocidade para analisar o processo de corte e as imagens foram capturadas com uma velocidade de 1000 quadros por segundo. A figura 28 mostra três quadros, que foram capturados no início da usinagem e após 10 ms e 20 ms. Os ensaios foram feitos sem uso de líquido refrigerante visando facilitar a coleta dos cavacos e a captura de imagens durante o corte. Além da fresa de topo citada também foram utilizadas outras ferramentas, com o objetivo de avaliar se a geometria e o material da ferramenta têm influência visível no processo de corte. Os autores chegaram à conclusão que para o arenito a variação dos parâmetros de corte não teve influência na forma do cavaco gerado e nem na rugosidade das superfícies usinadas. Os valores de rugosidade e os tamanhos de cavacos gerados na usinagem deste

material foram totalmente aleatórios, ou seja, uma repetição dos mesmos parâmetros pode gerar resultados diferentes. Já para o mármore Carrara de granulação fina, os resultados dos testes são repetitivos, e os parâmetros de corte mostram uma influência na rugosidade e no tamanho do cavaco gerado. Para atingir uma baixa rugosidade superficial neste material, uma baixa velocidade de corte e profundidade de corte deve ser usada em combinação com alto avanço por dente da ferramenta. Rochas são materiais naturais, portanto, suas propriedades diferem de material para material ou mesmo dentro do mesmo material (UHLMANN e MANTHEI, 2015).

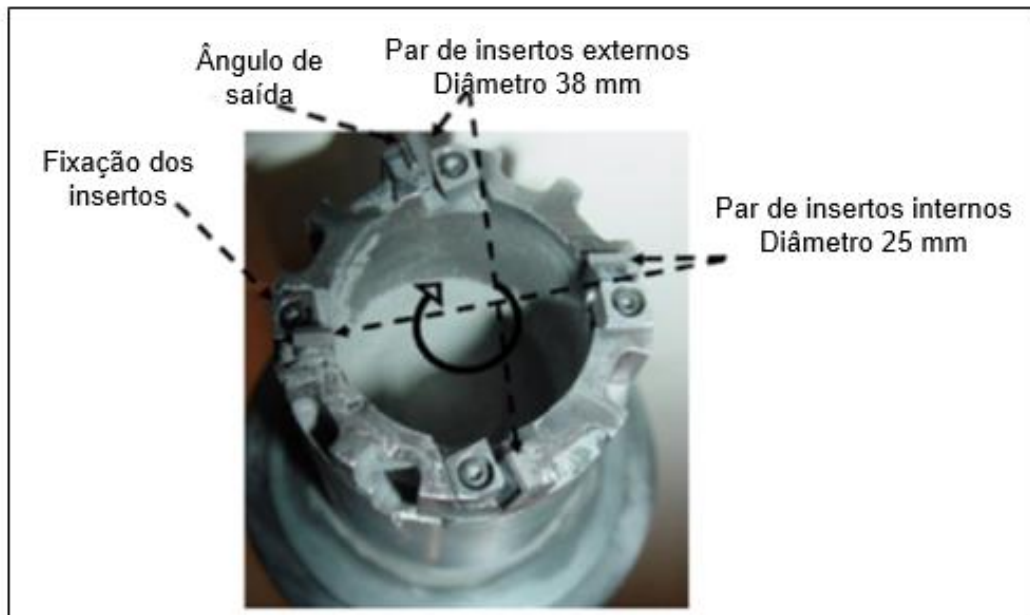
**Figura 28 - Imagens da câmera de alta velocidade na usinagem do Arenito de Posta**



Fonte: Adaptado Uhlmann e Manthei (2015)

Ainda, utilizando broca de insertos intercambiáveis revestidos por diamante policristalino (geometria definida) para furação de basalto, há o trabalho de pesquisa desenvolvido por Hamade et al. (2010). O experimento utilizou um centro de usinagem vertical HAAS VF2, um dinamômetro Kistler 9272 e um sistema de aquisição de dados. A broca (figura 29) é do tipo tubular, com 4 insertos intercambiáveis de carbeto de tungstênio cobertos por uma camada de 0,5 mm de PCD na região do corte. O estudo analisou o processo de furação a seco em dois tipos de basalto, um considerado macio (UCS 240 MPa) e o outro duro (UCS 350 MPa). Foram feitos 16 ensaios de furação para cada tipo de rocha, e as medições da aresta de corte e do raio de ponta foram feitos nas profundidades de 15, 30, 45, 60 e 75 mm. Em cada ensaio foi modificada a condição da ferramenta. Foram variados ângulo de corte (ou de saída) entre  $-5^\circ$  e  $-25^\circ$ , rotação entre 60 e 180 rpm (velocidades de corte ente 7,2 e 21,5 m/min) e avanço entre 0,01 e 0,05 mm/revolução da ferramenta.

**Figura 29 - Broca tubular com insertos intercambiáveis de PCD**



Fonte: Adaptado de Hamade et al. (2010)

Os resultados indicaram que o desgaste da aresta de corte e raio de ponta do inserto crescem com a dureza da rocha; à medida que o ângulo de saída se torna mais negativo o desgaste da aresta de corte diminui, enquanto o desgaste do raio de ponta aumenta; o desgaste da aresta de corte diminui com o aumento do avanço da broca, enquanto o desgaste do raio da ponta aumenta; o desgaste da aresta de corte diminui com o aumento da rotação da broca, enquanto o desgaste do raio da ponta permanece inalterado.

O LdSM vem conduzindo pesquisas sobre o processamento de rochas e dentre os processos estudados está o fresamento CNC. Tessmann (2009) fez pesquisas acerca de usinagem de opala branca sobre ágata utilizando fresas diamantadas de pequeno diâmetro (2 a 10 mm). Ela fez vários ensaios de usinagem e, diante da viabilidade do processo, apresentou a proposta de produção de camafeus utilizando Tecnologias 3D (Digitalização tridimensional e usinagem CNC com utilização de software CAM) e solicitou patente sobre o processo. Foram feitos ensaios de usinagem utilizando fresas diamantadas de diferentes geometrias nos quais foram usinadas várias formas geométricas diferentes e utilizados diferentes parâmetros de usinagem. Foi utilizada uma fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D comandado por software CAM. Dos ensaios realizados destaca-se a usinagem de uma figura humana (figura 30) obtida por digitalização 3D.

**Figura 30 - Figura humana usinada em opala sobre ágata**

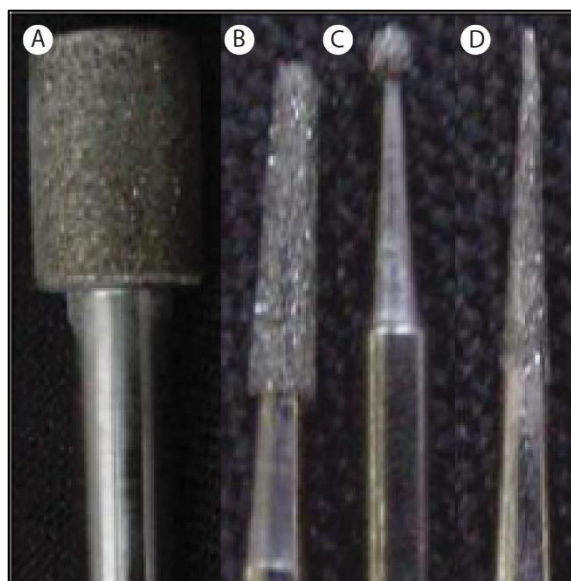


Fonte: Tessmann (2009)

Para a usinagem deste objeto foram utilizadas quatro fresas de diâmetros e geometrias diferentes (figura 31):

- Fresa 1: Ponta cilíndrica com 10 mm de diâmetro;
- Fresa 2: Ponta cônica com 2 mm de diâmetro com ângulo lateral de 3°;
- Fresa 3: Ponta esférica com 1,6 mm de diâmetro;
- Fresa 4: Ponta cônica com 1 mm de diâmetro e ângulo lateral de 2,5°.

**Figura 31 - Fresas usadas por Tessmann no ensaio de usinagem do objeto da figura 31**



A : Cilíndrica  $\varnothing$  10 mm, B: Cônica  $\varnothing$  2 mm, C: Esférica  $\varnothing$  1,6 mm, D: Cônica  $\varnothing$  1 mm

Fonte: Adaptado de Tessmann (2009)

Com a fresa 1 foi feito apenas um passe de usinagem, e com as demais foram feitos dois passes com cada uma. Os parâmetros de usinagem utilizados estão na tabela 10.

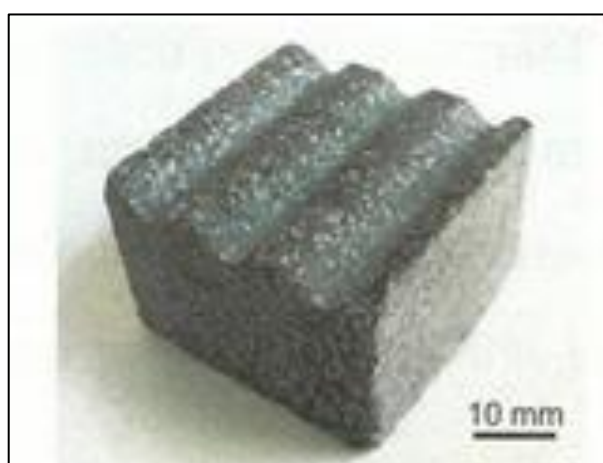
**Tabela 10 - Parâmetros de usinagem utilizados na usinagem do objeto da figura 28**

Fresa	1	2	3	4			
<b>Passe</b>	<b>Único</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Profundidade de Corte (mm)</b>	0,5	1	1	0,8	0,8	0,5	0,5
<b>Penetração de Trabalho (mm)</b>	0,5	0,5	0,25	0,4	0,4	0,25	0,1
<b>Rotação (rpm)</b>	15.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
<b>Avanço lateral (mm/min)</b>	150	100	100	50	50	50	50
<b>Avanço vertical (mm/min)</b>	25	50	50	25	25	25	25

Fonte: Adaptado de Tessmann (2009)

Outro trabalho de pesquisa nesta área de usinagem de rochas, realizado no LdSM - UFRGS, foi sobre processamento de riodacito (basalto carijó), feito por Etchepare (2014). O autor utilizou seis padrões de geometrias com diferentes complexidades, baseados em trabalho de Freitas (2006), adaptados para a sua pesquisa. Para efeito de comparação, os padrões foram usinados em gesso pedra tipo III e aço SAE 1020. Para usinagem do riodacito foram utilizadas fresas odontológicas diamantadas, da marca KG Sorensen, modelo 3018, com diâmetro aproximado de 3 mm. A figura 32 mostra um dos padrões geométricos utilizados no trabalho e a tabela 11 mostra os parâmetros de usinagem utilizados.

**Figura 32 - Padrão geométrico utilizado por Etchepare**



Fonte: Etchepare (2014)

**Tabela 11 - Parâmetros utilizados para usinagem do padrão geométrico da figura 26**

<b>Parâmetros de usinagem</b>	<b>Valores</b>
Profundidade de corte (mm)	0,5
Penetração de trabalho (mm)	0,2
Velocidade de rotação (rpm)	23.000
Velocidade de avanço (mm/s)	8,5
Velocidade de mergulho (mm/s)	4,0
Tempo de usinagem (min)	60,0
Material removido (mm <sup>3</sup> )	879,7

Fonte: Adaptado de Etchepare (2014)

Devido à grande variação de composição e dureza da matéria-prima natural, bem como das ferramentas de baixo custo, o autor não determinou limites precisos de parâmetros de fresamento que garantissem o sucesso da operação. Nesse sentido, ele propõe um mapa de tomada de decisão para ajustes da velocidade de avanço e profundidade de corte e, ainda, recomenda a utilização de ferramentas industriais de alto desempenho.

O conhecimento das propriedades das rochas e dos parâmetros de corte adequados com as ferramentas utilizadas é fator importante para o sucesso nas operações de usinagem, principalmente quando se utiliza máquinas automáticas. Também é de suma importância o conhecimento do processo de fresamento CNC e das ferramentas disponíveis quando se pretende trabalhar com o sistema CAD/CAM ou usinar a partir de sólidos obtidos por digitalização 3D. As estratégias de usinagem e as ferramentas utilizadas dependem do nível de precisão que se deseja obter no objeto usinado, em comparação com o sólido digital, obtido por CAD ou digitalização 3D.

### 2.3 DIGITALIZAÇÃO 3D

Além da Engenharia, para Lopes (2013), a utilização das tecnologias digitais 3D vem obtendo destaque cada vez maior em pesquisas multidisciplinares em diversos campos do conhecimento, tais como Arqueologia, Artes, Biofísica, Biomimética, Design, Egíptologia, Geologia, Medicina, Meteorítica e Paleontologia.

A Digitalização Tridimensional é uma destas tecnologias e como exemplos de campo de aplicação citam-se na área da Engenharia, na Odontologia e na Medicina, na avaliação de superfícies complexas e na metrologia. Tais aplicações podem ser no controle de qualidade, comparando peça produzida e projetada (HONG-SEOK; MANI, 2014; SUMMERS et al., 2014) ou na avaliação de desgaste de uma peça após uso (PARK et al., 2014; NEIS; FERREIRA; SILVA, 2014; STOBBER et al., 2014). Na Medicina, uma importante aplicação é na avaliação de desgaste de articulações ósseas, principalmente de fêmur (YUN et al., 2012), medição volumétrica e de forma em cirurgias plásticas e de reconstrução de mamas, entre outras tantas (PATETE et al., 2013; KOVACS, 2007).

O processo de digitalização a laser é um processo sem contato, de boa precisão, em geral rápido, porém, óticamente, depende de alguns fatores como opacidade e cor da superfície digitalizada. Este processo é adequado para objetos com grande quantidade de detalhes e independe da dureza da superfície digitalizada, pois não há contato direto entre o instrumento e superfície digitalizada. Existem desde equipamentos robustos, para uso em laboratórios, até equipamentos portáteis, para uso em campo. Dentre os métodos utilizados destacam-se dois: por Triangulação e por Holografia Conoscópica (SILVA et al., 2010).

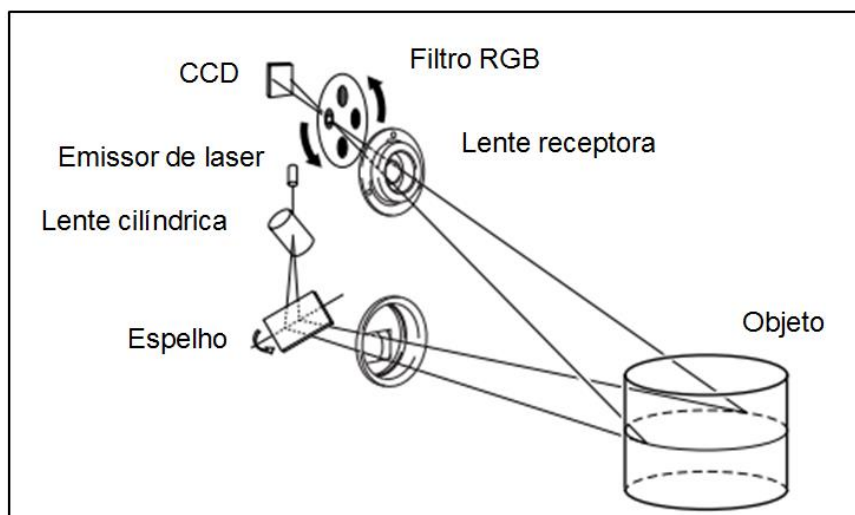
A digitalização a laser por triangulação já é uma técnica bem difundida no mercado atual. O sistema é composto de um emissor de Laser e um sensor ótico receptor, que pode ser uma câmera. O equipamento emite um padrão laser até o objeto, geralmente de linha, e o sensor ótico, calibrado com o emissor laser, identifica a posição deste padrão e calcula a distância até o objeto, por triangulação (GOMES, BELLON e SILVA, 2014). O equipamento Vivid 9i da Konica Minolta é um exemplo desta tecnologia. Este equipamento está disponível no LdSM - UFRGS, e foi utilizado pela equipe do laboratório na digitalização da Pedra Grande, assunto abordado no item 2.4. A figura 33 mostra esquematicamente o princípio da digitalização 3D por triangulação utilizado pelo equipamento.

No equipamento em questão, um emissor emite um feixe de laser que ao passar por uma lente cilíndrica o transforma em uma linha de laser. Esta linha de laser atinge um espelho, o qual, por meio de um mecanismo varia o ângulo de emissão da linha de laser atingindo o objeto e fazendo uma varredura em todo ele.



O laser, ao tocar no objeto, é refletido e recebido por um sensor CCD<sup>9</sup> que, por meio da triangulação, calcula a distância do emissor ao objeto. Este equipamento captura também a cor do objeto por meio de um filtro RGB<sup>10</sup>.

**Figura 33 – Princípio da digitalização 3D por triangulação**



Fonte: Adaptado de Konica Minolta (2017)

A Holografia Conoscópica é uma técnica interferométrica baseada na propriedade refrativa dupla dos cristais birrefringentes, descrita pela primeira vez por Sirat e Psaltis (1985) e patenteada pela Optimet Optical Metrology LTD (VALINO et al., 2016). Segundo Spagnolo, Cozzella e Simonetti (2013), a Holografia Conoscópica é um método amplamente utilizado para reconstruir perfis de superfície com alta precisão. Por meio do método de franja linear, é possível obter uma análise de profundidade com resolução melhor que  $1 \mu\text{m}$ .

Diferentemente dos sistemas por triangulação, o feixe de laser emitido do cabeçote digitalizador está no mesmo eixo óptico que o sinal retornado. Esta colinearidade permite medir orifícios internos, através de ótica dobrável (espelhos), e superfícies muito inclinadas, até ângulos superiores a 85 graus (OPTIMET, 2017). Os sistemas de digitalização que utilizam esta tecnologia são compostos de um cabeçote digitalizador, que utiliza este princípio e captura a coordenada de apenas

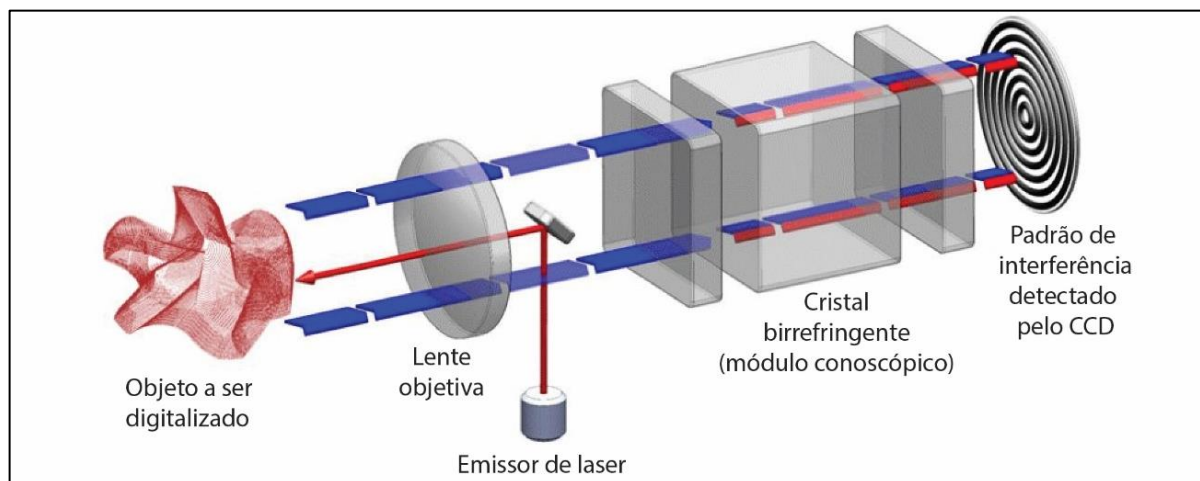
<sup>9</sup> **CCD** (Charge-Coupled Device) Dispositivo de carga acoplada. É um sensor semiconductor para captação de imagens, formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados.

<sup>10</sup> **RGB** é a abreviatura de um sistema de cores aditivas em que o Vermelho (Red), o Verde (Green) e o Azul (Blue) são combinados de várias formas de modo a reproduzir um largo espectro cromático.

um eixo (geralmente z). Este cabeçote é fixo em uma mesa de coordenadas que faz os movimentos x e y, geralmente em uma máquina CNC. Assim, o digitalizador por Holografia Conoscópica pode ter precisão diferente nas medidas das coordenadas x, y e z.

O princípio de funcionamento de um cabeçote digitalizador por Holografia Conoscópica está descrito a seguir e ilustrado na figura 34. Uma fonte de diodo emite um laser, que é focado por uma lente objetiva e atinge o objeto a ser medido. Parte da luz dispersa retorna do objeto para o sensor, passa pelo cristal birrefringente e é detectada pela câmera CCD. O padrão de interferência resultante é detectado e os algoritmos de processamento de sinal são então usados para recuperar a distância da informação medida (OPTIMET, 2017).

**Figura 34 – Funcionamento esquemático do digitalizador por Holografia Conoscópica**



Fonte: Adaptado de Optimet (2017)

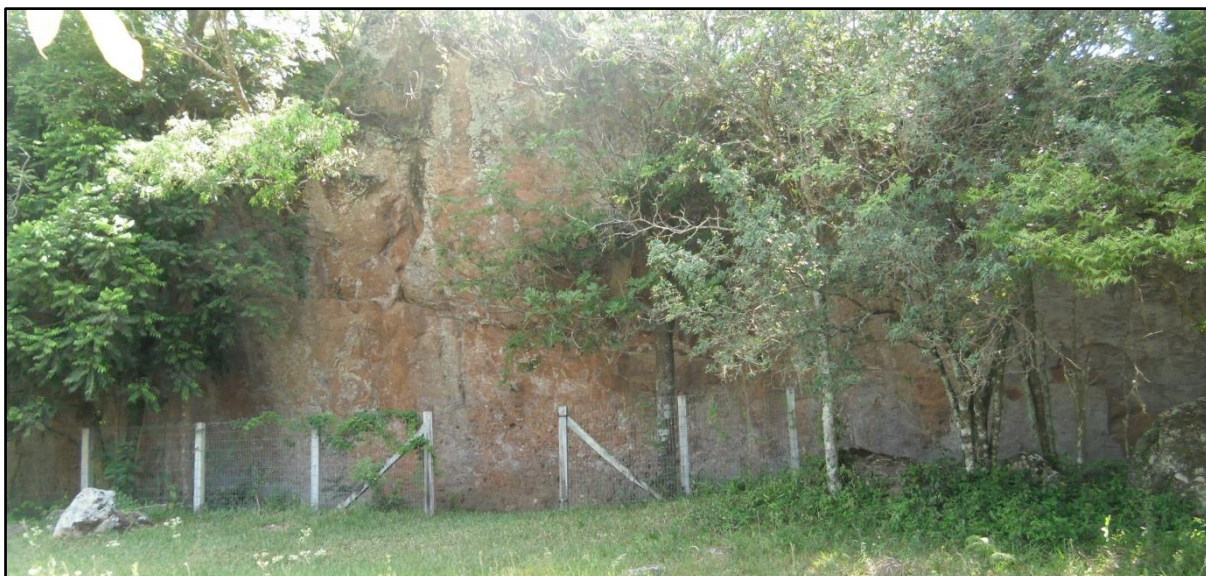
Uma das muitas aplicações das tecnologias 3D é na preservação do patrimônio cultural (GOMES, BELLON e SILVA, 2014). Pode-se, através destas tecnologias, recuperar fachadas de prédios históricos, obras de arte como esculturas, ou produzir réplicas de objetos de importância histórica. O LdSM também vem desenvolvendo diversos trabalhos nessa área, por exemplo ROSSI, SILVA e KINDLEIN JR (2014), PEREIRA, KINDLEIN JR e SILVA (2015), SILVA e KINDLEIN JR (2013), FLORES, SILVA e KINDLEIN JR (2012), SILVA e CALDOVINO (2015), CARDOSO et al. (2014), FLORES, SILVA, DUARTE e KINDLEIN JR (2012). Neste contexto, pode-se citar o caso dos petróglifos do Abrigo da Pedra Grande (POHLMANN et al., 2012 e POHLMANN et al., 2011).

## 2.4 ABRIGO DA PEDRA GRANDE

Segundo dados do site do Guia Turístico do município de São Pedro do Sul - RS (2017), a Pedra Grande é o maior monumento petroglífico do estado do Rio Grande do Sul, com consideráveis quantidades de inscrições rupestres, algumas gravadas há cerca de três mil anos.

Para Pohlmann et al. (2012), este monumento petroglífico com considerável quantidade de inscrições rupestres é um elemento de importância histórica e etnográfica da ocupação humana na região. A Pedra Grande está localizada junto ao sítio arqueológico RS-SM-7 e este local é conhecido pelo nome de “Abrigo da pedra Grande”. A figura 35 mostra uma imagem geral da Pedra Grande (foto tirada em 2018).

**Figura 35 – Abrigo da Pedra Grande**

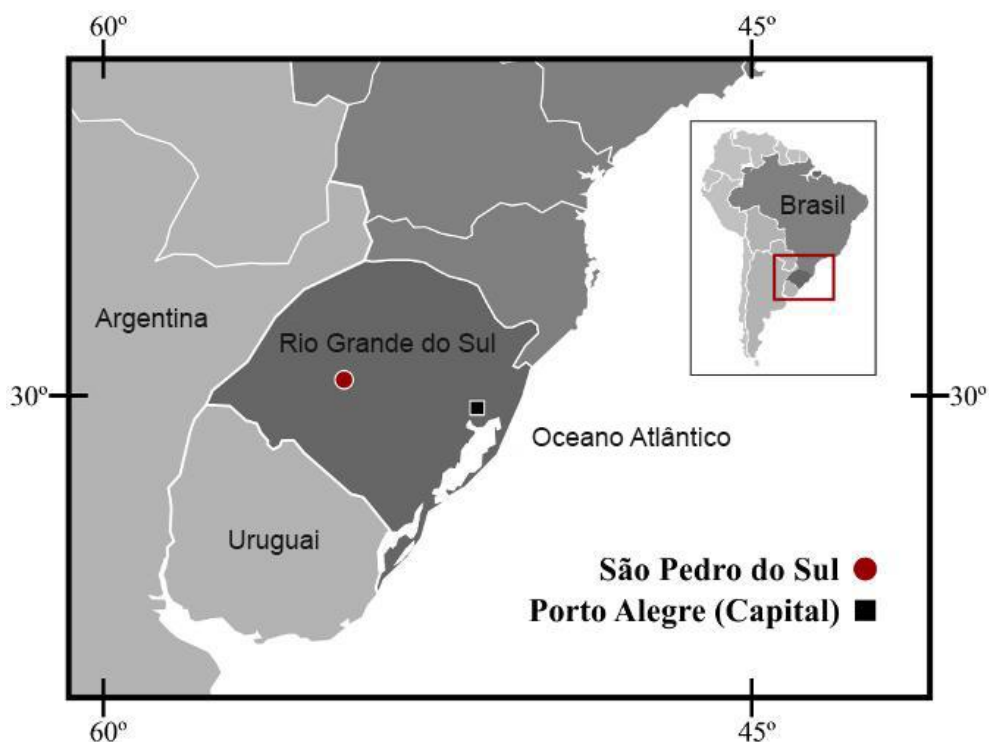


O Abrigo da Pedra Grande localiza-se no município de São Pedro do Sul, nas encostas da Serra, próximo ao Arroio Ribeirão e ao Rio Toropi, subfluente do Rio Ibicuí. O sítio foi descrito por Brochado e Schmitz (1976) no texto *Petroglifos Estilo de Pisadas*, que serve de base para o estudo da Arte Rupestre no Rio Grande do Sul (OLIVEIRA, 2009).

O município de São Pedro do Sul está localizado nas coordenadas geográficas 29°37'14" de latitude sul e 54°10'44" de longitude oeste e a 173 m de altitude em relação ao nível do mar, ocupando uma área de 885,8 km<sup>2</sup> (Geógrafos, 2017). A figura 36 mostra um mapa de localização da cidade de São Pedro do Sul no estado do Rio Grande do Sul.

O abrigo da Pedra Grande é um bloco de arenito que mede 86,5 m de comprimento por 9 m de espessura máxima e 8,5 m de altura no centro, solevantado e orientado NNO-SSE. Os petróglifos estão concentrados na região central do Abrigo da Pedra Grande, região onde este apresenta maior profundidade. Esta região forma um painel que mede 24 m de comprimento chegando a mais de 2 m de altura. Nas duas extremidades também se encontram petróglifos em pequeno número (SCHMITZ e BROCHADO, 1982).

**Figura 36 - Localização do município de São Pedro do Sul – RS**



Fonte: Adaptado de Pohlmann et al. (2011)

As análises dos isótopos de carbono revelaram que estes petróglifos apresentam quatro datações distintas; 1633 a 1637 d.C., 1305 a 1385 d.C., 1110 a 1190 d.C. e 900 a 790 a.C. (SCHMITZ e BROCHADO, 1982).

Para Schmitz e Brochado (1982), estes petróglifos foram gravados por meio de três técnicas distintas: picoteamento e raspagem; polimento; broqueamento com ferramenta rotativa. Os sulcos executados por picoteamento e raspagem são rasos e largos, os executados por polimento apresentam seções em U muito rasas ou em V muito agudas, que medem de 2 a 3 mm até quase 25 mm de largura com profundidades correspondentes. As gravações executadas pela técnica de perfuração podem ser polidas ou broqueadas e medem desde 2 ou 3 mm até quase 200 mm de diâmetro, com profundidades desde uns 2 ou 3 mm até quase 150 mm.

Os petróglifos foram classificados em três grupos diferenciados por motivos:

- Pegadas de Felinos: depressões circulares (entre 60 e 80 mm), rasas, rodeadas por quatro ou seis depressões menores;
- Pisadas de Aves: três sulcos retilíneos convergentes, ou um sulco em meia lua, cortado na metade por outro sulco retilíneo e vertical;
- Símbolos Sexuais Femininos: sulcos circulares e elípticos com uma perfuração alongada no centro (BROCHADO e SCHMITZ, 1979 apud OLIVEIRA, 2009).

Segundo Oliveira (2009), é possível estabelecer uma cronologia relativa das gravações através da sobreposição de motivos a partir das perfurações menores encontradas no meio de outras maiores ou de perfurações maiores no interior das grades formadas pelos sulcos. Assim, foram estabelecidos três estilos diferenciados, A, B e C que são descritos a seguir e podem ser vistos nas figuras 37, 38 e 39.

### **Estilo A**

Temporalidade: 1100 a.C e A.D. 800 – Relacionado a cultura pré-cerâmica sem ponta de projétil.

Técnica utilizada: picoteamento e raspagem.

Motivos: pegadas de felinos e aves formando rastros, círculos ou elipses com perfuração ou sulco central (símbolo sexual feminino), sulcos retilíneos verticais (símbolo fálico), sulcos ondulantes (serpentes).

**Figura 37 - Petróglifos estilo A**



Fonte: Oliveira (2009)

**Estilo B**

Temporalidade: A.D. 900 – 1220 - Relacionado à cultura pré-cerâmica com ponta de projétil.

Técnica utilizada: polimento e picoteamento.

Motivos: pegadas de aves não formando rastros, sulcos curvilíneos em forma de U, sulcos retilíneos verticais e paralelos alinhados, espinhas de peixe, perfurações alinhadas, sulcos retilíneos entrecruzados (estrelas), perfurações das quais irradiam sulcos (Sol).

**Figura 38 - Petróglicos estilo B**



Fonte: Oliveira (2009)

**Estilo C**

Temporalidade: A.D. 1200 – 1400 - Relacionado à cultura ceramista.

Técnica utilizada: polimento e perfurações.

Motivos: pegadas de aves de três ou cinco dedos, sulcos retilíneos verticais e paralelos cortados por horizontais formando grades

**Figura 39 - Petróglicos estilo C**



Fonte: Oliveira (2009)

Pode-se afirmar também que os petróglifos hoje existentes formam um agregado que foi sendo aumentado em vários momentos sucessivos desde antes de 900 a.C e depois de A.D 1300, portanto ao longo de dois mil e duzentos a dois mil e quatrocentos anos (BROCHADO e SCHHMITZ, 1976 apud OLIVEIRA, 2009).

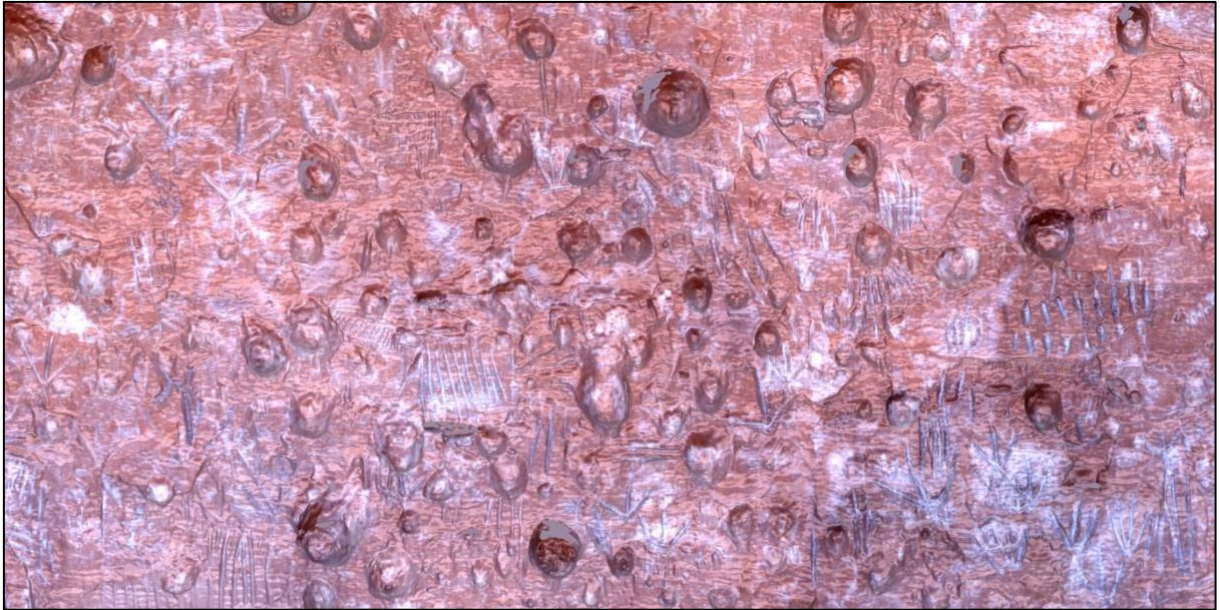
Uma equipe do LdSM - UFRGS realizou trabalho de pesquisa no Abrigo da Pedra Grande no mês de outubro do ano de 2010 e digitalizou uma área de interesse de aproximadamente 3,5 m de largura por 2,2 m de altura, na qual foi adquirida a maior parte dos petróglifos da Pedra Grande. Este trabalho teve o intuito de registrar as inscrições do Abrigo da Pedra Grande, por digitalização tridimensional, como possibilidade de preservação e valorização do patrimônio cultural da região. Segundo Pohlmann et al. (2012), os modelos virtuais obtidos permitem a construção de modelos reais em escala da Pedra Grande, bem como sua disponibilização em museus virtuais e Web sites. A figura 40 mostra uma imagem do processo de digitalização da Pedra Grande e a figura 41 mostra uma parte da malha tridimensional de triângulos da área digitalizada.

**Figura 40 - Digitalização 3D da Pedra grande, câmera fotográfica e scanner 3D Vivid 9i**



Fonte: LdSM - UFRGS (2010)

**Figura 41 – Malha tridimensional de triângulos de parte da área digitalizada (3 x 1,5 m)**



Fonte: LdSM - UFRGS (2010)

Outro estudo que vale salientar sobre a Pedra Grande, utilizando o arenito é a dissertação de mestrado de Tamara Barbian intitulado Design e tecnologia: gravação a laser de desenhos no arenito (2015).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos deste trabalho foi estabelecida uma metodologia composta de quatro fases conforme mostra o quadro 3. O detalhamento das etapas e os métodos empregados estão descritos nos parágrafos seguintes.

**Quadro 03 - Metodologia composta por quatro fases e suas respectivas etapas**

<b>1ª Fase: Revisão bibliográfica e Ensaio preliminares</b>	A	Usinagem de alguns sulcos em superfície de arenito com ferramentas de metal duro e de diamante para observar o comportamento; selecionar as ferramentas de interesse e definir parâmetros de usinagem, partindo de dados obtidos por pesquisas em trabalhos com materiais de características semelhantes.
	B	Escolha de um motivo para usinar em fresadora CNC (Para produzir uma réplica de um objeto em arenito).
	C	Fazer programação CAM utilizando as estratégias de usinagem disponíveis no software Edgcam.
	D	Usinagem do objeto em material de boa usinabilidade (de parâmetros conhecidos) para avaliação das estratégias e para obtenção de um padrão de comparação.
	E	Usinagem do objeto em Arenito.
	F	Análise visual do objeto usinado e definição da viabilidade do método (Qualificação).
<b>2ª Fase: Material</b>	A	Visita às pedreiras e coleta de material.
	B	Preparação das amostras.
	C	Ensaio Físicos e mecânicos.
<b>3ª Fase: Novos Ensaio, avaliação e seleção de novas ferramentas e parâmetros de usinagem</b>	A	Aquisição de novas ferramentas de metal duro e de diamante.
	B	Obter a geometria original das ferramentas para posterior comparação e avaliação do desgaste (Digitalização 3D e lupa estereoscópica).
	C	Usinagem de sulcos retilíneos em arenito com as novas ferramentas com o objetivo de avaliar o comportamento, selecionar as ferramentas de interesse e definir parâmetros de usinagem, partindo de dados obtidos nos ensaios preliminares.
	D	Avaliação das rugosidades obtidas na usinagem do arenito.
	E	Avaliação das temperaturas envolvidas na usinagem do arenito.
	F	Usinagem de arenito para obtenção de imagens do mecanismo de corte através de uma câmera de alta velocidade de captura (12000 fps).
	G	Seleção das ferramentas de interesse e definição de parâmetros de usinagem
	H	Escolha de um motivo para usinar (Objeto para Réplica: Pedra Grande).
	I	Fazer programação CAM.
	J	Usinagem do objeto em material de boa usinabilidade (de parâmetros conhecidos) para avaliação das estratégias e para obtenção de um padrão de comparação.
	L	Usinagem do objeto em Arenito.
	M	Digitalização tridimensional dos objetos usinados e das ferramentas utilizadas.
	N	Comparação das geometrias dos objetos usinados com a geometria do objeto inicial (objeto digital utilizado no CAM), através do software Geomagic Qualify.
	O	Avaliação do desgaste das ferramentas (Digitalização 3D e lupa estereoscópica).
<b>4ª Fase: Final</b>	A	Análise dos resultados, escrita da tese e publicação dos resultados em revista científica.

### 3.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Os primeiros ensaios práticos para avaliação da viabilidade da usinagem do arenito, bem como para definição de ferramentas e parâmetros de usinagem, foram feitos numa fresadora convencional, figura 42.

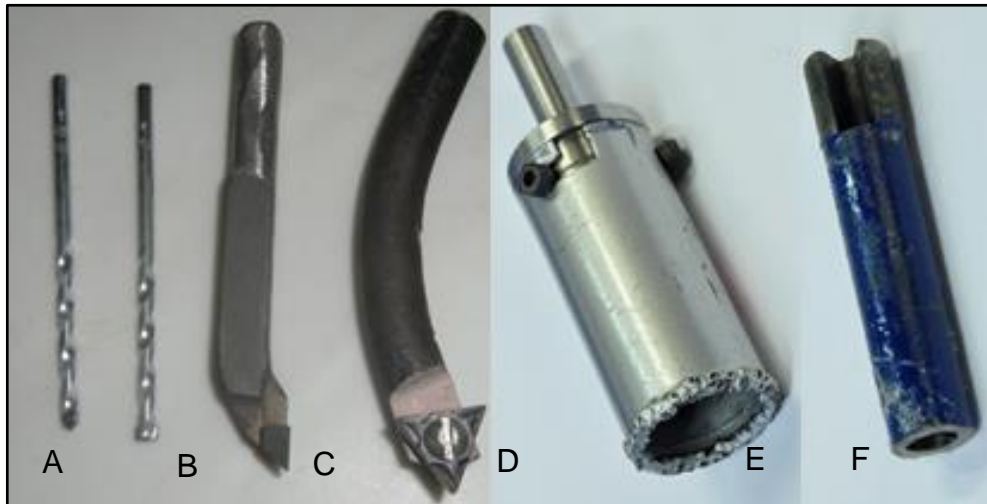
**Figura 42 - Ensaio preliminares de usinagem do arenito em fresadora convencional**



Foram ensaiadas diferentes ferramentas de metal duro e brocas diamantadas para mármore e granito na função de fresas, figura 43. Inicialmente, foram feitas operações de faceamento utilizando ferramentas com 10, 19, 33 e 68 mm de diâmetro e fresamento de rasgos com ferramentas de 4 e 10 mm de diâmetro. A figura 44 mostra o resultado dos primeiros ensaios. A fresadora tinha rotação fixa de 900 rpm. Utilizaram-se velocidades de corte de 11 a 192 m/min e velocidades de avanço de aproximadamente 100 mm/min, com profundidade de corte de 0,5 e 1 mm.

Numa análise visual preliminar, pode-se concluir que com as ferramentas e os parâmetros de usinagem utilizados foi possível usinar o arenito, mas o desgaste das ferramentas de metal duro foi acentuado, enquanto que as ferramentas diamantadas pouco se desgastaram. Estes ensaios serviram como ponto de partida para aquisição de novas ferramentas e execução de novos ensaios em equipamentos CNC.

**Figura 43 - Ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares**



A: Broca comercial de Metal Duro  $\varnothing$  4 mm, B: Broca de Metal Duro de ponta reta  $\varnothing$  4 mm, C: Ferramenta de Metal Duro  $\varnothing$  19 mm, D: Ferramenta de Metal Duro  $\varnothing$  68 mm, E: Serra copo diamantada  $\varnothing$  33 mm, F: Broca diamantada  $\varnothing$  10 mm

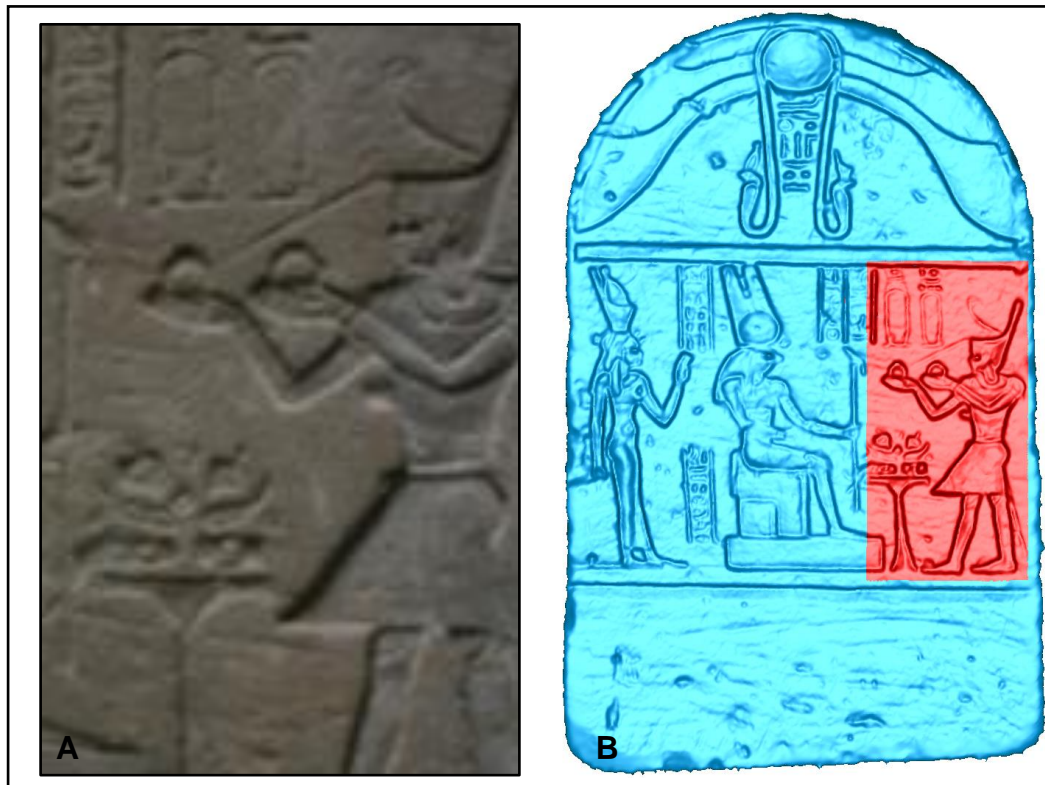
**Figura 44 - Resultado dos primeiros ensaios de usinagem do arenito**



Para a realização de um ensaio utilizando um modelo 3D digitalizado, partiu-se inicialmente de uma malha de triângulos de uma estela egípcia pertencente ao Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro, cedida pelo professor Jorge Lopes para fins de estudo. O referido arquivo é fruto de digitalização tridimensional de uma estela em arenito com inscrições egípcias em baixo relevo (figura 45). Essa ação foi tomada pelo fato de as estelas apresentarem baixa

profundidade no eixo z, o que inicialmente facilitaria a usinagem. Outro motivo da escolha da estela foi pelo fato de que já ocorreu um trabalho de doutorado nesta temática (estelas) interpretando a visão diferenciada dos egípcios, sugerindo que este povo tinha capacidade de visualização tridimensional do objeto (BUSATO, 2013).

**Figura 45 – Estela egípcia**



Detalhe da peça original (A) e Modelo 3D digitalizado (B) com área de interesse selecionada

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2013)

Partindo-se do arquivo digitalizado com extensão stl, o modelo foi reduzido em 1/3 do tamanho e foi feito um corte delimitando a área a ser reproduzida, aproximadamente 43 x 76 mm (detalhe em vermelho da figura 45B). Este procedimento foi feito por se tratar de pesquisa de laboratório e utilizar máquinas de usinagem de pequeno porte. Foi utilizada uma fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D e a programação foi realizada no software Edgecam.

A estratégia utilizada para usinagem foi de uma operação de faceamento utilizando fresa de topo reta de 10 mm de diâmetro; uma operação de desbaste, com a mesma fresa; uma operação de acabamento com uma fresa de topo reta de 4 mm de diâmetro; uma operação final de acabamento, utilizando-se uma fresa de topo com ponta esférica de 2 mm de diâmetro.

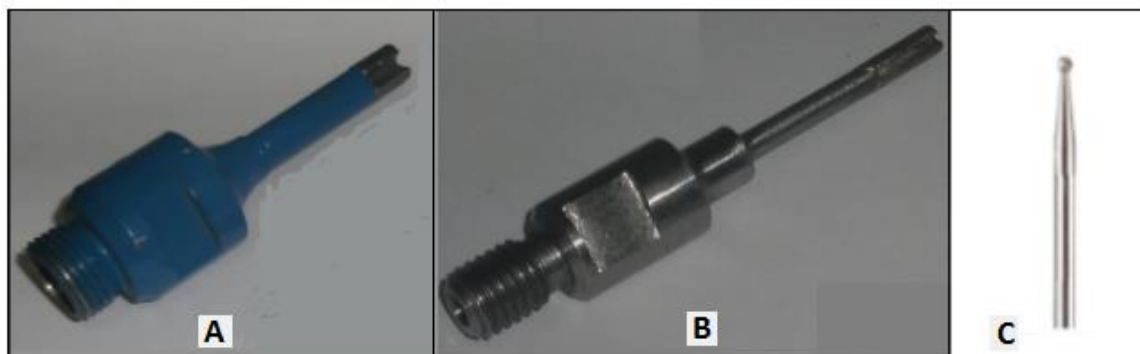
Primeiramente, usinou-se a estela no material Renshape® 460, para analisar trajetos da ferramenta e acabamento, visto que se trata de um material de boa usinabilidade, podendo utilizar-se altas velocidades de corte e de avanço. Para faceamento deste material utilizou-se 10.000 rpm, velocidade de avanço lateral de 4.000 mm/min, velocidade de avanço vertical de 1.000 mm/min, profundidade de corte de 0,2 mm por passe e penetração de trabalho de 5 mm (50% do diâmetro da fresa). O desbaste foi feito com os mesmos parâmetros de corte, com exceção da profundidade de corte que foi de 0,1 mm. A operação de acabamento com a fresa de diâmetro 4 mm foi executada com 18.000 rpm e os demais parâmetros de corte mantidos iguais aos da operação anterior. A operação final, com a fresa de ponta esférica, foi executada com 24.000 rpm e os demais parâmetros de corte mantidos, com exceção da profundidade de corte (0,04 mm). Foram utilizadas baixas profundidades de corte em função da posterior usinagem do arenito. Assim, as mudanças de parâmetros de usinagem do Renshape® 460 para o arenito foram apenas as velocidades de avanço, o que permitiu avaliar as estratégias de usinagem e o acabamento final com maior segurança. A usinagem do material foi feita com utilização de fresas inteiriças de metal duro.

O arenito utilizado para a usinagem foi adquirido em lojas de material de construção da região do Vale do Rio dos Sinos, sem conhecimento de mais detalhes sobre o mesmo. A estratégia utilizada para a usinagem da parte da estela em arenito foi a mesma utilizada para a usinagem no Renshape® 460, porém, as velocidades de avanço lateral e vertical foram 5% das anteriores, ou seja, 200 mm/min para avanço lateral e 50 mm/min para avanço vertical. Os parâmetros de rotação e profundidade de corte foram mantidos. Outra diferença se referiu às ferramentas de corte utilizadas para a usinagem do arenito. Para as operações de faceamento e desbaste, no lugar da fresa, foi utilizada uma broca diamantada comercial para granito e mármore, com diâmetro de 10 mm (figura 46A). Para a primeira operação de acabamento, foi utilizada uma broca diamantada comercial para mármore e granito, com diâmetro de 4 mm (figura 46B). Para a operação final de acabamento utilizou-se uma ponta diamantada Dremel 7103, de ponta esférica de diâmetro 2 mm (figura 46C). Tais parâmetros de usinagem foram selecionados em função de ensaios anteriores realizados, informações técnicas do fornecedor e revisão bibliográfica.

A avaliação da superfície usinada foi feita por meio da digitalização 3D e

comparada com o modelo digital que deu origem a ela.

**Figura 46 - Ferramentas utilizadas na usinagem da Estela Egípcia em arenito**



A: broca de diamante  $\varnothing 10$ ; B: broca de diamante  $\varnothing 4$ ; C: Ponta Dremel 7103

Para a digitalização da superfície usinada utilizou-se um scanner a laser por holografia conoscópica Tecnodrill Digimill 3D com cabeçote digitalizador Conoprobe 1000. Para tanto, utilizou-se resolução (x,y) de 0,1 mm e lente de 150 mm, que possui exatidão (z) de 0,035 mm. Após a digitalização, as nuvens de pontos, tanto da peça em Renshape® 460 como da peça em Arenito, foram processadas no software Geomagic Studio e, através do software Geomagic Qualify, foram comparadas com o modelo 3D inicial.

### 3.2 COLETAS E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL

Para a execução desta pesquisa houve a necessidade de visitar várias pedreiras, de modo a encontrar uma que atendesse aos requisitos necessários para coletar material para a pesquisa. Os requisitos exigidos foram ter fácil acesso, licenciamento ambiental em dia e apresentar material que visualmente se mostrasse coeso e aparentemente de boa usinabilidade para o estudo.

#### 3.2.1 Visitas às pedreiras e coleta de material.

Cinco pedreiras foram visitadas na região do vale do rio dos Sinos e do rio Caí. Das pedreiras visitadas, apenas a pedreira Souza, em São João do Deserto, Lomba Grande - RS, e a pedreira Dorival, no bairro Lajeado, em São Sebastião do Caí - RS atenderam aos requisitos desejados. Optou-se pelo estudo do arenito da Pedreira Dorival por apresentar maior facilidade na aquisição de amostras, principalmente pela localização geográfica e facilidade de acesso. A figura 47 mostra

a localização da Pedreira Dorival em São Sebastião do Caí, e a figura 48 mostra uma imagem da lavra.

**Figura 47 - Localização da pedreira Dorival em São Sebastião do Caí**



Fonte: Modificado de <https://www.google.com.br/#q=google+maps> (09/2017)

**Figura 48 - Pedreira de arenito em atividade, em São Sebastião do Caí**



### 3.2.2 Caracterização do Material

A caracterização do arenito foi feita através de ensaios físicos, mecânicos e geológicos. Foram realizados os seguintes ensaios, no Laboratório de Mecânica de Rochas do DEMIN da UFRGS: Ensaio de Compressão Triaxial, Determinação do Módulo de Young, Ensaio de Tração Indireta (Ensaio Brasileiro), Ensaio de Flexão, Ensaio de Abrasão, quantificação da Porosidade e Densidade e determinação do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI). Os ensaios seguiram as normas específicas utilizadas para esses ensaios no Laboratório de Mecânica de Rochas.

- Ensaio de Compressão Triaxial; ASTM D2664.
- Ensaio de Tração Indireta (ensaio brasileiro); ASTM D3967.
- Ensaio de Flexão; ABNT NBR 15845:2010.
- Ensaio de Determinação das Propriedades Físicas; ABNT NBR15845:2010.

Para o Ensaio de Compressão Triaxial foram preparadas 15 amostras de arenito de forma cilíndrica de aproximadamente 50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento. Das 15 amostras, 7 foram preparadas com as camadas de estratificação perpendiculares ao eixo do cilindro e 8 a 45°. O ensaio foi realizado em prensa servo-controlada da marca Controls com 200 t (2000 kN) de capacidade e controle de carga de 500 N/s. As medidas das deformações axiais foram realizadas por meio de LVDT (*linear variable differential transformer*) com curso máximo de 10 mm. Os dados obtidos neste ensaio foram utilizados também para a determinação do Módulo de Young. A determinação da coesão e ângulo de atrito foi baseada no Geological Strength Index (GSI), de autoria de Hoek & Brown (1997). Esta avaliação é baseada na observação das características das amostras de rocha, por meio de testemunho de sondagem. Outro fator analisado é a resistência uniaxial média da rocha, obtida por meio de ensaios e estimada para o maciço rochoso. A condição adotada é a estimativa da coesão e ângulo de atrito para o maciço rochoso a partir dos testemunhos de sondagem e ensaio triaxial. Neste ensaio foi adotado o valor de 100 para o GSI por se tratar de ensaio para rocha intacta.

Para o Ensaio de Tração Indireta foram preparadas 11 amostras de forma cilíndrica de aproximadamente 50 mm de diâmetro, com comprimento entre 20,85 e 42,96 mm. Das 11 amostras, 5 foram preparadas com o eixo do cilindro perpendicular às camadas de estratificação e 6 a 45°. O ensaio de tração indireta foi realizado em prensa com suporte côncavo, apropriado para as amostras (point-load), com capacidade de 400 bar.



Para o Ensaio de Flexão foram preparadas 7 amostras de formato retangular de 50 x 100 x 200 mm. O ensaio foi realizado em prensa instrumentada da marca Controls com 150 t (1500 kN) de capacidade e com carregamento em três pontos.

Para o Ensaio de Determinação das Propriedades Físicas foram preparados 20 corpos de prova. A massa das amostras foi medida utilizando uma balança de precisão com erro de 0,1 g. Foram determinadas Densidade Aparente, Porosidade, Absorção de Água e Umidade.

A avaliação da abrasividade da rocha foi determinada pelo Índice de Abrasividade Cerchar (CAI). O ensaio consiste no deslocamento e interação de uma ponteira metálica sobre a superfície de uma amostra de rocha por uma distância de 10 mm com carga normal de 70 N. A deformação sofrida pela ponteira metálica é determinada a partir da média de duas medidas perpendiculares do diâmetro da superfície resultante do desgaste com o uso do microscópio. Foram preparadas 18 amostras para avaliação do CAI. Das 18 amostras, 8 foram preparadas com a área de ensaio paralela à estratificação do arenito e 10 com a área perpendicular.

Para a caracterização geológica da rocha foram feitas análises por Petrografia, por Difração de Raios X e por Fluorescência de Raios X.

Para a petrografia foram confeccionadas lâminas delgadas da rocha, que consiste em cortar uma fatia de alguns milímetros de espessura dessa rocha e desgastá-la com abrasivos (carborundum) de diferentes granulometrias, até atingir a espessura de 30  $\mu\text{m}$ , o que faz com que a grande maioria dos minerais formadores de rocha fiquem transparentes ou translúcidos, permitindo a sua análise com luz transmitida. Essa lâmina foi impregnada com um polímero que possui um corante de cor azul, a fim de deixá-la mais coesa e assim permitir seu desgaste até a espessura de 30  $\mu\text{m}$ . Para a sua descrição, o equipamento utilizado foi um microscópio petrográfico Zeiss Axio Imager, do Departamento de Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências da UFRGS, com uma câmera fotográfica modelo Axio Cam MRc da marca Zeiss acoplada ao microscópio, que por sua vez está ligada a um computador que opera com o programa Snap 2550 Zen lite ano 2012, para gerenciar a obtenção e a qualidade das imagens.

Para a análise de Fluorescência por Raios X foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRF 1800 com tensão máxima de 75 kV, corrente máxima 53,3 mA e fonte ânodo Rh (4kW), pertencente ao LACER – UFRGS.

A análise por Difração de Raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro de

raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 ( $\theta$ - $\theta$ ) equipado com monocromador curvado de grafite no feixe secundário e tubo de ânodo fixo de Cu, operando a 40 kV e 40 mA, pertencente ao Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da UFRGS. O intervalo angular analisado foi de 2 a 75° 2 $\theta$  em passo de 0,05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e 0,2 mm no detector.

### 3.3 ENSAIOS DE USINAGEM COM A UTILIZAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS

Os ensaios preliminares de usinagem foram realizados sem a preocupação de medições detalhadas de desgaste e acabamento. Tais ensaios tiveram o objetivo de uma avaliação da viabilidade do processo de usinagem do arenito e direcionamento para aquisição de ferramentas mais específicas para estudos mais detalhados. Após os ensaios iniciais e aquisição de alguns dados, auxiliado também de revisão bibliográfica e ainda baseado na oferta do mercado, decidiu-se pela aquisição e ensaios de outros tipos de ferramentas e utilização de fresadora CNC.

#### 3.3.1 Ferramentas ensaiadas

Vários tipos de ferramentas foram ensaiadas, buscando avaliar o comportamento das mesmas, do ponto de vista de durabilidade e qualidade da superfície usinada. O quadro 4 mostra os tipos de ferramentas adquiridas.

**Quadro 04 - Ferramentas adquiridas para os ensaios de usinagem de arenito**

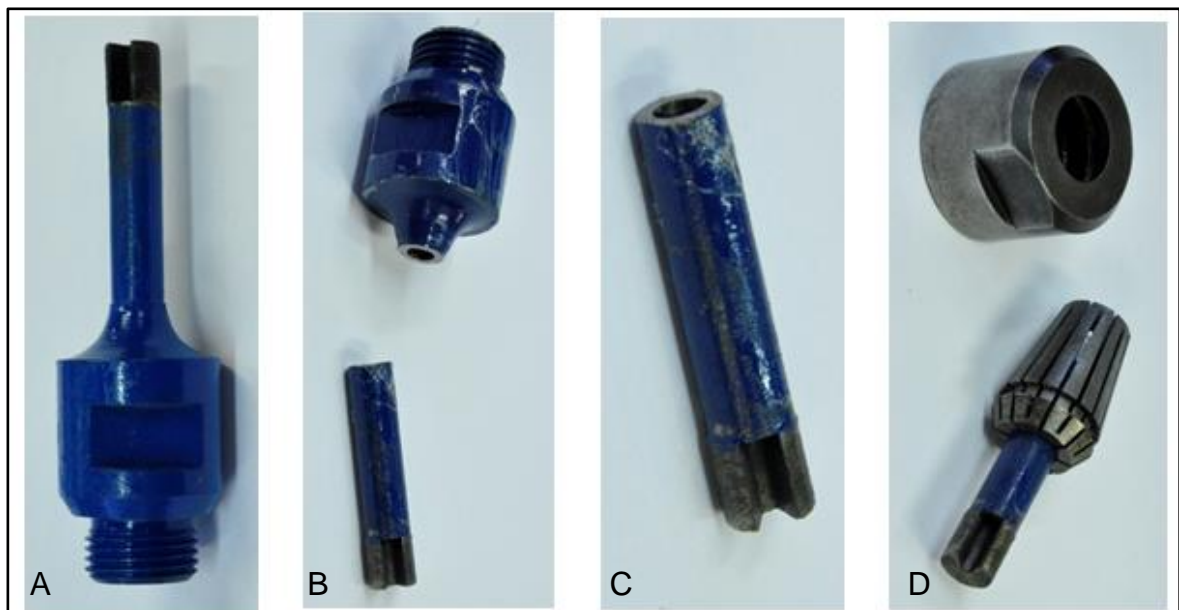
	Nome comercial	Marca/Referência	Diâmetro (mm)	Raio da ponta	Nº de cortes	Quant.	Preço* unitário (R\$)
Ferramentas de geometria não definida	Broca diamantada para mármore e granito	Diamax convencional	10	-	-	2	48,00
			6	-	-	2	42,00
		Diamax dorvo	4	-	-	2	42,00
	Ponta Diamantada Cilíndrica	Master Diamond D126 PMD100	10	-	-	5	31,00
Ferramentas de geometria definida	Fresa de Metal Duro com revestimento	Alltech RTAP 1005	10	-	4	1	248,00
	Fresa de Topo (para pastilhas intercambiáveis)	Sandvik R390-012A16-11L	12	-	1	1	766,02
	Pastilha intercambiável de Diamante (PCD)	Sandvik R390-11T304E P4-NL-CD10	-	-	-	4	420,12
	Pastilha intercambiável de Metal Duro	Sandvik R390-11T304E-NLH13A	-	-	-	10	51,00
	Fresa de PCD para centro de usinagem	Fresa Wirutex D. 6X7 H6X35 CT55 Z1R3 FR-FU-R-DX		6	3	1	5
Fresa Wirutex D.10X7 H10X35 CT55 Z2R5 FR-FU-R-DX			10	5	2	2	318,03**

\* Preços em novembro de 2014 e \*\* preços em dezembro de 2015.

### 3.3.1.1 Ferramentas de diamantes impregnados em matriz metálica ligante (geometria não definida)

Estas ferramentas, já descritas no tópico 2.2.1 (fig. 13, pág. 57), também são denominadas de ferramentas de compósitos de diamantes embebidos em matriz metálica ligante. Devido às dificuldades de encontrar no mercado e ao alto custo, as primeiras ferramentas diamantadas adquiridas para os ensaios de usinagem com o arenito foram brocas diamantadas para furação de mármore e granito da marca Diamax, nos diâmetros de 10, 6 e 4 mm. Essas ferramentas foram utilizadas com a função de fresa. As mesmas precisaram ser adaptadas para fixação nas pinças do spindle da fresadora Tecnodrill Digimill 3D. Estas brocas são fornecidas com uma cabeça para fixação por rosca, em furadeiras específicas, e ainda apresentam uma furação para injeção de fluido de refrigeração pelo seu interior. Assim, essa parte precisou ser retirada. A figura 49 mostra uma broca de 10 mm de diâmetro que passou por este processo. Estas ferramentas são compostas de uma haste de aço e uma ponta de diamantes impregnados em matriz metálica, a qual é soldada nesta haste. O tamanho dos grãos de diamante não é informado pelo fabricante, mas uma ferramenta de 10 mm de diâmetro foi avaliada em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), possibilitando uma estimativa entre 200 e 400  $\mu\text{m}$  (40 a 70 US Mesh).

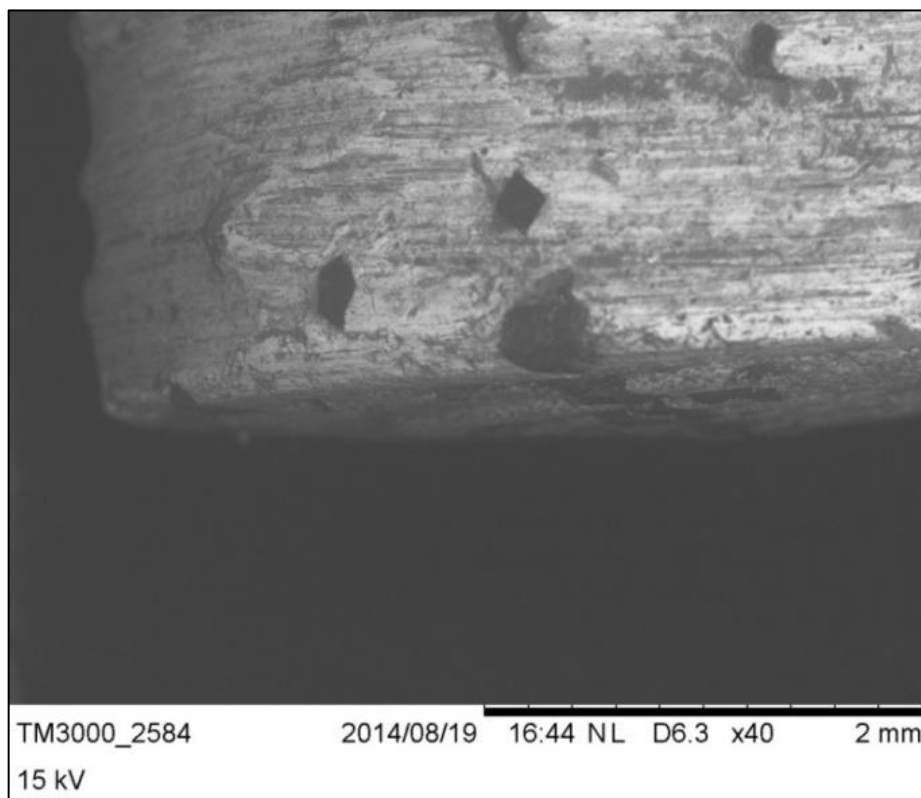
**Figura 49 - Preparação de Broca Diamantada Diamax de 10 mm de diâmetro para ser usada como fresa**



Broca comercial (A), Separação (B), Ferramenta resultante (C), Montagem na pinça para utilização como fresa (D)

A figura 50 mostra a imagem de uma região da parte cortante da ferramenta na qual é possível ver os grãos de diamante na matriz metálica e fazer uma avaliação de tamanho.

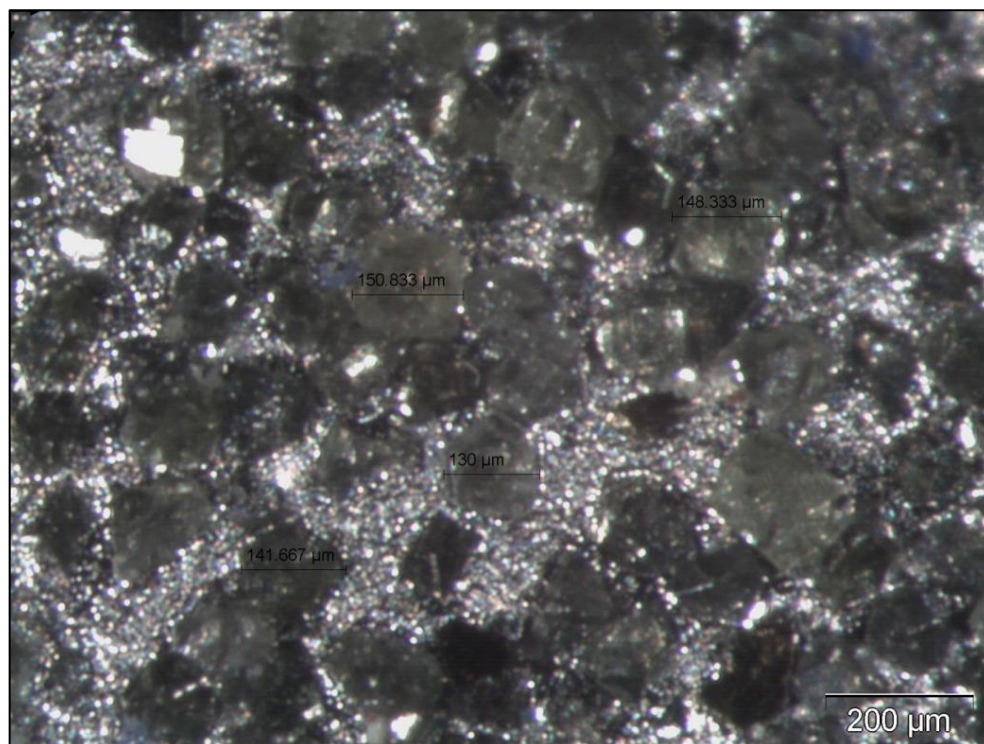
**Figura 50 - Imagem de Broca Diamax 10 mm usada, em MEV**



### 3.3.1.2 Ferramentas diamantadas por eletrodeposição (geometria não definida)

As ferramentas diamantadas por processo eletrolítico adquiridas para os ensaios foram da marca Master Diamond. A figura 15 pág. 58 mostra uma ferramenta diamantada por eletrodeposição, de ponta cilíndrica de 10 mm de diâmetro com grãos de diamante D126 deste fabricante. Grãos de Diamante tamanho D126 (FEPA) equivalem a tamanho 120 a 140 US Mesh que, conforme a tabela 2 (pág. 38), equivale a grãos de tamanho entre 0,105 e 0,125 mm. Esta ferramenta foi uma das utilizadas nos ensaios descritos neste trabalho. Foi feita uma imagem em Lupa estereoscópica onde nota-se que o tamanho dos grãos de diamante informados pelo fabricante é um pouco menor do que o da ferramenta fornecida. Os grãos medidos apresentaram tamanho entre 130 e 151  $\mu\text{m}$  (figura 51).

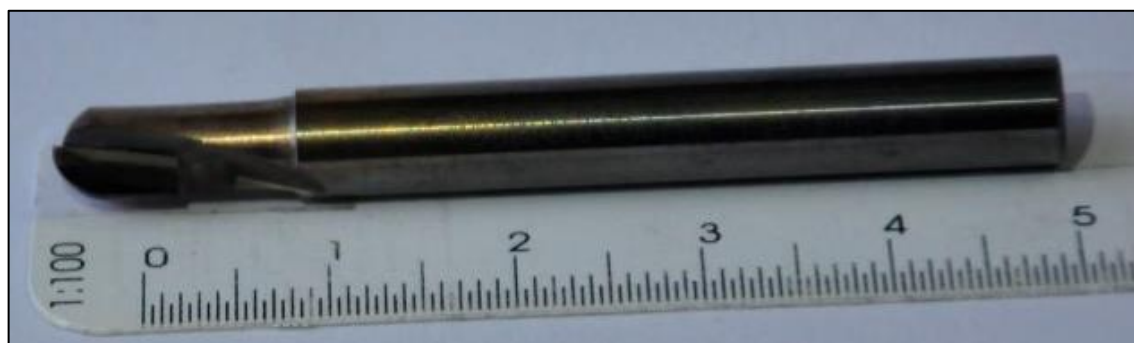
**Figura 51 - Imagem da área de corte da ferramenta diamantada por eletrodeposição de 10 mm de diâmetro (fig. 15, pág. 58) mostrando os grãos de diamante**



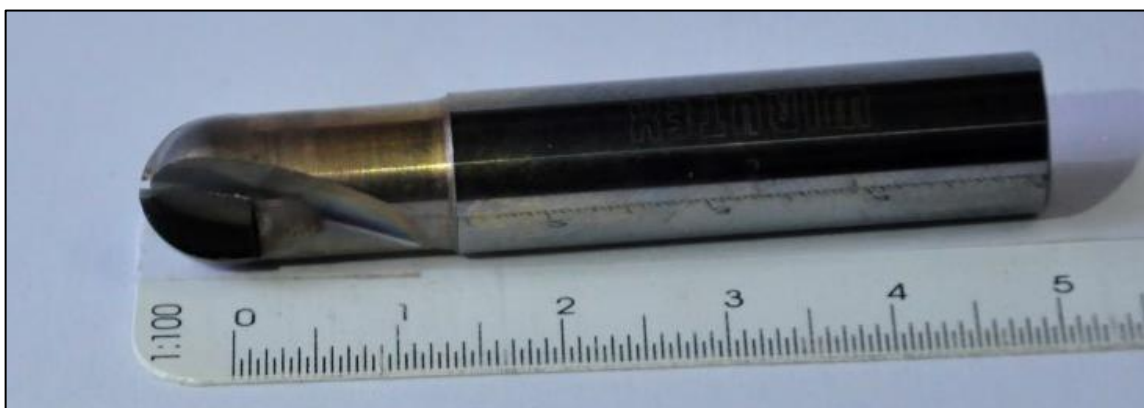
### 3.3.1.3 Ferramentas de diamante policristalino – PCD (geometria definida)

As ferramentas de geometria definida foram adquiridas dos fabricantes Wirutex e Sandvik. As figura 52 e 53 mostram fresas de PCD da marca Wirutex com ponta esférica de 6 e 10 mm de diâmetro. Cabe ressaltar que a ferramenta de 6 mm de diâmetro tem apenas um corte (um dente) e a de 10 mm apresenta dois cortes (dois dentes), sendo um maior e o outro menor.

**Figura 52 - Fresa de PCD Wirutex de 6 mm de diâmetro com ponta esférica**

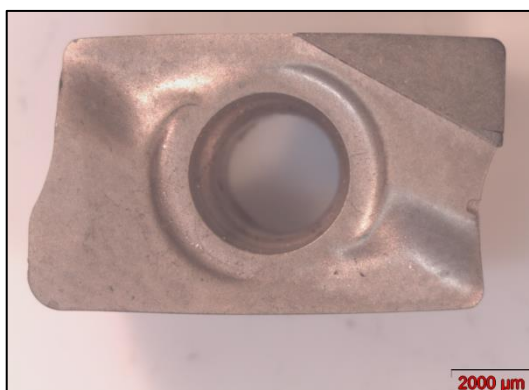


**Figura 53 - Fresa de PCD Wirutex de 10 mm de diâmetro com ponta esférica (dois cortes)**



A figura 54 apresenta um inserto intercambiável de PCD da marca Sandvik utilizada numa fresa de 12 mm de diâmetro (figura 55). Esta fresa é um suporte no qual podem ser montados insertos intercambiáveis de diferentes materiais, mas de mesma geometria, de modo que o diâmetro de usinagem da ferramenta seja sempre 12 mm.

**Figura 54 - Inserto intercambiável (pastilha) de PCD Sandvik**



**Figura 55 - Fresa Sandvik de 12 mm de diâmetro com inserto intercambiável de PCD**



### 3.3.1.4 Ferramentas de Metal Duro (geometria definida)

As ferramentas de metal duro adquiridas foram da marca Sandvik, insertos intercambiáveis (pastilhas), e da marca Altech Tools (fresa inteira de Metal Duro). Estas ferramentas foram ensaiadas novamente devido ao resultado dos ensaios preliminares e às informações sobre dureza das mesmas, obtidas na revisão bibliográfica, embora os resultados dos ensaios iniciais tivessem mostrado desgaste acentuado em relação às ferramentas diamantadas. Conforme tabela 5 pág. 52, metal duro apresenta dureza Knoop 16 GPa e quartzo 10 GPa, logo os grãos predominantes no arenito apresentam dureza inferior à da ferramenta. Outra razão do interesse por estas ferramentas é a grande disponibilidade, com grandes variações de formas geométricas e baixo custo, nas geometrias mais usuais, comparado com as ferramentas de diamante. A figura 56 mostra a imagem de um inserto intercambiável Sandvik de metal duro usado na fresa de 12 mm de diâmetro (já apresentada na figura 55). A figura 57 mostra uma fresa inteira de metal duro de ponta esférica de 10 mm de diâmetro utilizada nos ensaios

**Figura 56 - Inserto intercambiável (pastilha) de Metal Duro utilizado na fresa de 12 mm de diâmetro**



**Figura 57 - Fresa inteira de metal duro de ponta esférica de 10 mm de diâmetro utilizada neste trabalho**



### **3.3.2 Ensaios para avaliar desgaste de ferramentas, rugosidades e granulometria dos cavacos gerados**

Para a avaliação destes itens foram ensaiadas as cinco ferramentas de ponta reta apresentadas no tópico anterior (3.3.1). A seguir é descrita a metodologia utilizada nesta fase de ensaios.

Utilizou-se, como material para usinagem, um bloco quadrado de arenito de 200 mm de lado e 70 mm de altura, procedente da Pedreira Dorival de São Sebastião do Caí - RS. Neste bloco foram usinados cinco rasgos longitudinais com 5 mm de profundidade, com largura igual ao diâmetro da ferramenta e mais 5 mm. As operações de usinagem foram executadas na Fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D.

Cada rasgo foi feito com uma ferramenta diferente: rasgo 1, Broca Diamantada 10 mm de diâmetro; rasgo 2, Fresa com Pastilha de Metal Duro de 12 mm de diâmetro; rasgo 3, Fresa com Pastilha de PCD de 12 mm de diâmetro; rasgo 4, Fresa de Metal Duro inteiriça de 10 mm de diâmetro; rasgo 5, Ponta Diamantada por Eletrodeposição D126 Cilíndrica de 10 mm de diâmetro.

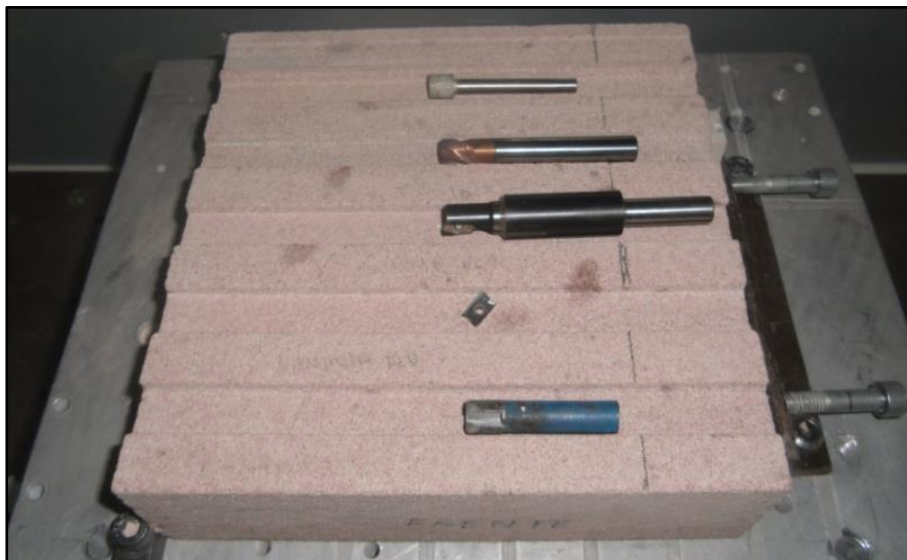
Nos cinco rasgos o procedimento foi o mesmo, com exceção do último, onde houve necessidade de reduzir a velocidade de avanço longitudinal para 50% das demais devido ao pequeno tamanho do grão de diamante da ferramenta. Tanto para ferramentas de geometria definida como de geometria não definida foram usados os mesmos parâmetros de usinagem. Esse procedimento foi realizado no intuito de comparar os resultados com diferentes ferramentas trabalhando em condições similares.

Em cada rasgo foram feitos cinco passes com profundidade de corte de 1 mm, totalizando 5 mm de profundidade. Os passes iniciaram fora da peça e passaram por todo o comprimento dela, sendo o primeiro com a largura igual ao diâmetro da ferramenta. Quando a ferramenta passou por todo o comprimento da peça foi feito um deslocamento lateral de 5 mm e ela voltou usinando, de modo que nas faces laterais do rasgo o corte foi concordante, tanto na ida quanto na volta da ferramenta. Assim sendo, os rasgos usinados com ferramenta de 10 mm de diâmetro ficaram com 15 mm de largura e os usinados com ferramenta de 12 mm de diâmetro ficaram com 17 mm de largura. A velocidade de rotação utilizada em todos os casos foi de 12.000 rpm e a velocidade de avanço longitudinal da ferramenta foi de 1.000 mm/min em todos os rasgos, com exceção do rasgo 5, feito com 500 mm/min em



função dos grãos finos da ferramenta. A figura 58 mostra uma imagem do bloco ensaiado com a usinagem dos rasgos e as respectivas ferramentas.

**Figura 58 - Imagem do bloco de arenito com a usinagem dos 5 rasgos e as ferramentas utilizadas na usinagem**



Após a usinagem destes 5 rasgos, o bloco foi virado na mesa da máquina, fixado com a parte usinada para baixo e foram feitos mais 4 rasgos. Para tanto, foram utilizadas as mesmas ferramentas e parâmetros de processo, porém, com o avanço lateral da ferramenta em sentido contrário ao anterior, de modo que nos dois planos laterais dos rasgos o corte foi discordante. Em função do custo maior, utilizaram-se as mesmas ferramentas da etapa anterior, com exceção da ferramenta diamantada por eletrodeposição, que ficou visivelmente desgastada e possui custo menor. Também, por apresentar desgaste excessivo, a ferramenta de metal duro inteiriça não foi utilizada nesta etapa.

#### *3.3.2.1 Avaliação do desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem dos rasgos.*

O desgaste das ferramentas utilizadas neste ensaio foi avaliado por três métodos: perda de massa, fotografia em lupa estereoscópica, e dimensional, através da medição com paquímetro.

O equipamento utilizado para a avaliação do desgaste por perda de massa foi uma balança eletrônica analítica da marca Quimis<sup>®</sup>, modelo Q-500L210C, utilizada para uma faixa de medição de 1 a 210 g com leitura de 0,1 mg, na qual as ferramentas foram pesadas antes e depois da usinagem dos rasgos.

Para a avaliação do desgaste por fotografias utilizou-se uma Lupa

estereoscópica da marca Olympus, com câmera Infinity 1 e software AnalySIS, na qual as imagens foram capturadas antes e após a usinagem dos rasgos e comparadas entre si.

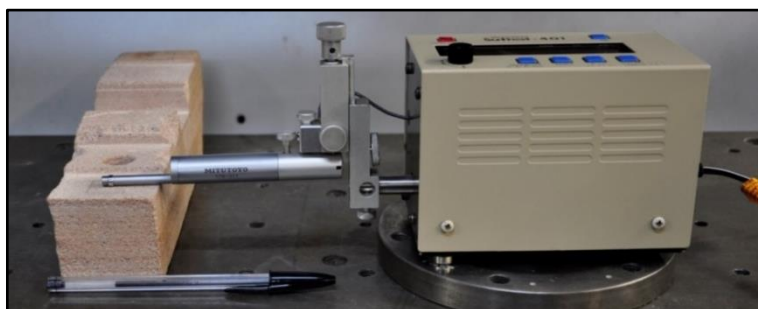
Para a avaliação dimensional foi utilizado um Paquímetro Universal Mitutoyo com resolução de 0,02 mm com o qual foram medidas as ferramentas antes e depois da usinagem dos rasgos. Apenas a medida da altura da ferramenta foi avaliada.

### 3.3.2.2 Avaliação das rugosidades das superfícies usinadas

A metodologia utilizada foi a medição através de digitalização a Laser, desenvolvida por Silva (2006). Neste método faz-se a medição das coordenadas x, y e z de um conjunto de pontos, da superfície a ser avaliada, através da digitalização a laser por holografia conoscópica. Estes pontos devem estar alinhados numa única direção (x ou y) e a distância entre o primeiro e o último deve ser maior que o comprimento de amostragem determinado pela norma de medição de rugosidade pelo método convencional. Após a captura dos pontos, utiliza-se um software desenvolvido por Silva (2006) para esta finalidade, que processa os dados e informa o valor da rugosidade. Esta metodologia só tem validade comprovada para parâmetros de rugosidade Ra superiores a 5,4  $\mu\text{m}$ , medidos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287. Neste sentido, buscou-se validar essas medidas a partir de um rugosímetro convencional. O equipamento convencional, com apalpador, foi utilizado apenas para validação, com a intenção de preservá-lo, devido à abrasividade do arenito.

Para a tomada de decisão por este método, inicialmente, foram avaliadas algumas superfícies usinadas, que aparentavam apresentar a menor rugosidade superficial. Para tanto, foi utilizado um rugosímetro convencional Mitutoyo Surf test 401 com apalpador 178-311 (Figura 59).

**Figura 59 - Medição de rugosidade com rugosímetro convencional com apalpador**



Foram feitas 8 medições do parâmetro de Rugosidade média (Ra), com comprimento de amostragem (Cutoff) de 0,8 mm. Apesar da grande variação (de 13,8 a 30  $\mu\text{m}$ ), conforme a tabela 12, observa-se que a rugosidade é alta e o método de digitalização 3D proposto por Silva (2006) pode ser utilizado com segurança.

**Tabela 12 - Medições de rugosidades para avaliação do método**

Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )
1	26,5
2	29,0
3	30,0
4	16,0
5	22,0
6	22,0
7	13,8
8	25,0
Média	23,0

Assim, para avaliação das rugosidades das superfícies usinadas foram feitas sete medições em cada rasgo usinado, sendo três no fundo e duas em cada lateral dos rasgos. Além das medições das rugosidades das superfícies usinadas com cada ferramenta, estas superfícies foram observadas na Lupa Estereoscópica e foram feitas fotografias para compará-las entre si.

### 3.3.2.3 Avaliação da granulometria do cavaco gerado por cada ferramenta

Durante os ensaios de usinagem dos rasgos, foram coletadas amostras dos cavacos gerados por cada tipo de ferramenta e foram feitas análises granulométricas no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER). Para tanto utilizou-se o equipamento Cilas Particle Analyser 1180.

### 3.3.3 Análise do corte e geração de cavacos com câmera de alta velocidade

Com o objetivo de analisar o corte e a remoção de cavacos no arenito registraram-se imagens com uma câmera de alta velocidade de captura, com a utilização de 3 diferentes ferramentas e diferentes parâmetros de usinagem. Para a captura, utilizou-se uma câmera Phantom V411 da marca Vision Research, com taxas de 12.000 e 15.000 quadros por segundo, a uma resolução de 640 x 480 pixels.

As imagens foram capturadas usinando arenito com a fresa de 12 mm de

diâmetro com uma aresta de corte, com pastilha de metal duro e com pastilha de PCD, e com a ferramenta de diamante impregnada em matriz metálica de 10 mm de diâmetro, todas de topo reto. A velocidade de rotação utilizada foi 15.000 rpm em todos os ensaios, a profundidade de corte foi mantida em 1 mm, a penetração de trabalho 50% do diâmetro da ferramenta e a velocidade de avanço variou de 400 a 2.000 mm/min. Foram capturadas imagens da usinagem com corte concordante e discordante para todas as ferramentas. A figura 60 mostra o processo de captura de imagens com a câmera de alta velocidade.

**Figura 60 – Câmera de alta velocidade obtendo imagens da usinagem do arenito**



### **3.3.4 Medição das temperaturas na usinagem do arenito**

Os principais objetivos de conhecer as temperaturas envolvidas no processo de usinagem do arenito foram, primeiramente, verificar se existe ou não necessidade de usar fluido de refrigeração e também avaliar as possíveis influências na vida das ferramentas. O conhecimento das temperaturas da peça, da ferramenta e da interface peça-ferramenta permite avaliar, com maior clareza, as condições térmicas que o material em usinagem e as ferramentas de corte estão submetidos, podendo-se, com isto, ter melhores condições de avaliar a vida delas. As ferramentas diamantadas, tanto de geometria definida, como de geometria não definida, são compostas de duas partes, que são a parte cortante, que é a ferramenta

propriamente dita e um suporte, geralmente de aço ou metal duro. A parte cortante é unida ao suporte por um processo de brasagem, logo a temperatura de trabalho destas ferramentas deve ser inferior à temperatura de fusão do material de união usado, para que as mesmas se mantenham unidas.

Medir a temperatura de corte não é uma tarefa fácil devido às condições dinâmicas do processo (Bickel, 1963; Machado e Silva, 1999; Komanduri e Hoh, 2001 apud Santos e Sales, 2007). Segundo Santos e Sales (2007), existem na literatura diversos modelos físicos, juntamente com modelos matemáticos e computacionais usados para calcular a temperatura de usinagem. Basicamente, conforme estes autores, os princípios de medição utilizados pelos métodos são resumidos em Ferraresi (1977) e Shaw (1984): Método calorimétrico; Medição por técnicas metalográficas; Medição da força termoelétrica entre a ferramenta e peça; Medição por inserção de termopares na ferramenta de corte; Medição indireta através de vernizes térmicos; Medição de energia de radiação na faixa do espectro infravermelho; Pós-químicos; Deposição de filmes PVD; Técnicas de problemas inversos. Dos métodos citados, foi utilizada a radiação por IV (Termografia).

Utilizando o método da medição de energia de radiação na faixa do espectro infravermelho foram feitas medições utilizando-se um Termógrafo da marca Testo, modelo 890-2. O termógrafo foi ajustado para ler a máxima temperatura da área avaliada. O principal objetivo deste ensaio foi estimar a faixa média de temperaturas do processo para verificar a possibilidade de usinagem sem refrigeração. Vale salientar que os primeiros ensaios com as ferramentas de diamante PCD foram realizadas com a usinagem imersa em água. Essa sistemática foi abandonada pelos seguintes motivos: dificuldades de trabalhar com refrigeração com os equipamentos disponíveis no LdSM; tinha-se o objetivo de obter imagens do processo de usinagem com a câmera Vision Research Phantom V411; verificou-se posteriormente que na usinagem com essa ferramenta sem refrigeração a temperatura não ultrapassou 120°C.

As medições com o termógrafo foram efetuadas em ensaios de usinagem de arenito procedente da Pedreira Dorival, de São Sebastião do Caí, numa Fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D (figura 61). As ferramentas utilizadas no ensaio foram Broca Diamantada e Fresa com Pastilhas de PCD sem refrigeração, com os parâmetros de usinagem variados, conforme tabela 13, em operações de faceamento em blocos de arenito.

**Tabela 13 – Parâmetros de usinagem utilizados nas medições de temperaturas**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro da ferramenta	12 mm (Pastilha de PCD) e 10 mm (Broca)
Penetração de trabalho	50% do diâmetro da ferramenta
Profundidade de corte	0,2, 1 e 1,5 mm
Velocidade de avanço lateral	400 a 1000 mm/min
Velocidade de rotação	Variando de 6.000 a 24.000rpm

**Figura 61 - Medição das temperaturas com termógrafo Testo 890-2**

Também durante o ensaio de usinagem dos rasgos longitudinais foram feitas algumas medições de temperatura. Salientam-se as dificuldades em manter o foco da área a ser avaliada devido ao movimento da ferramenta, tanto de rotação como de avanço longitudinal. Outro problema que dificulta as medições é a reflexão da superfície. A área de interesse para conhecer as temperaturas foi na região da interface peça ferramenta.

### **3.3.5 Ensaio de vida das ferramentas selecionadas**

Os ensaios anteriores mostraram que as ferramentas de diamante impregnado em matriz metálica, as Pastilhas de PCD e as Pastilhas de Metal Duro proporcionaram os melhores resultados, conforme será exposto no tópico 4.3.1. Com base nestas informações, decidiu-se fazer mais ensaios para avaliar a vida destas três ferramentas, analisando o desgaste da ferramenta em relação ao volume de material removido. Nestes novos ensaios foram avaliados os desgastes das

ferramentas em operações de faceamento, registrando os desgastes progressivos.

Os ensaios foram feitos para avaliar a vida das ferramentas, ou seja, as ferramentas foram utilizadas até atingir um nível de desgaste que não permita prosseguir a usinagem sem afiação ou troca da ferramenta de corte.

A definição de final de vida para a Pastilha de PCD foi pela observação de vibrações excessivas, alteração de ruído e nível de desgaste tal que o substrato de metal duro onde está assentado o PCD começa a atritar com o material em usinagem.

Para a Pastilha de Metal Duro o final da vida foi definido também por vibrações excessivas, alteração de ruído e quando o nível de desgaste chega muito próximo do corpo da fresa onde são fixados os insertos intercambiáveis.

No caso da Broca Diamantada o final da vida foi definido quando o nível de desgaste faz com que a parte inferior da ferramenta deixe de ser plana, ficando com o canto arredondado, tendendo a esférica, até o ponto que não faz mais uma operação de faceamento plano e sim cheio de ondas, com a utilização de penetração de trabalho de 50% do diâmetro da fresa.

As ferramentas foram avaliadas por fotografia em lupa estereoscópica. As imagens foram capturadas numa lupa estereoscópica da marca Olympus com câmera Infinity 1 e software AnalySIS.

Somente a pastilha de PCD foi avaliada também pelo método de digitalização tridimensional por ser a ferramenta de maior custo e de maior interesse. A ferramenta foi digitalizada sem uso (nova) e após o final da vida. Para tanto foi utilizado um equipamento de digitalização a laser por holografia conoscópica Tecnodrill Digimill 3D com cabeçote Digitalizador Conoprobe 1000. Foi utilizado lente de 25 mm e passo lateral de 0,02 mm. Após as digitalizações os dados foram tratados com os softwares Geomagic Studio e Qualify e foi avaliado o desgaste da ferramenta. As especificações das ferramentas avaliadas estão no quadro 5.

**Quadro 05 – Especificações das ferramentas utilizadas nos ensaios de vida**

<b>Denominação da Ferramenta</b>	<b>Especificação do Fornecedor</b>
Broca Diamantada	Diamax com diâmetro de 10 mm
Pastilha de Metal Duro	Sandvik R 390 – 11T304E - NL H13A
Pastilha de PCD	Sandvik R 390 – 11T304E - P4 – NL – CD10

O ensaio realizado consistiu em operações de faceamento de um bloco de arenito com 200 x 200 x 70 mm. As condições de trabalho, operação e parâmetros de usinagem estão listados na tabela 14. Cada ferramenta fez operações sucessivas de faceamento até chegar ao fim de vida. A cada passe com profundidade de corte de 1 mm em toda superfície do bloco de arenito a ferramenta foi retirada da máquina, fotografada na lupa estereoscópica e recolocada para novo faceamento. Assim, os intervalos iniciais de avaliação foram de aproximadamente 20 minutos de trabalho efetivo e 40 cm<sup>3</sup> de material removido. Depois estes intervalos foram aumentados, tendo como objetivo diminuir o tempo total gasto no ensaio.

**Tabela 14 - Parâmetros para ensaio de vida das ferramentas**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro da ferramenta	12 mm (pastilhas) e 10 mm (Broca)
Penetração de trabalho	50% do diâmetro da ferramenta
Profundidade de corte	1 mm
Velocidade de avanço lateral	400 mm/min
Velocidade de mergulho	40 mm/min
Velocidade de rotação	15.000 rpm
Sentido de corte	Otimizado (concordante na ida e discordante na volta)

### 3.4 ESCOLHA DO MOTIVO PARA USINAR

Esta escolha levou em conta que deveria ser um objeto em arenito, que tivesse valor histórico e cultural, que fosse possível a obtenção do modelo digital e que pudesse ser usinado no LdSM. Assim, foi definido como motivo para usinar, parte das inscrições rupestres da superfície da Pedra Grande de São Pedro do Sul - RS.

#### 3.4.1 Obtenção do Modelo 3D

As inscrições milenares foram digitalizadas em outubro de 2010 num trabalho de campo da disciplina “DMM-0027 – Tópicos Especiais em Design de Produto II” do PGDesign – UFRGS, ministrada pelo professor Dr. Fábio Pinto da Silva e pela professora Dra. Lauren da Cunha Duarte, que trata de técnicas de digitalização 3D, gravação e corte a laser.

O equipamento utilizado para digitalização foi o Vivid 9i da Konica Minolta, que trabalha pelo princípio de medição por triangulação a laser. Este equipamento

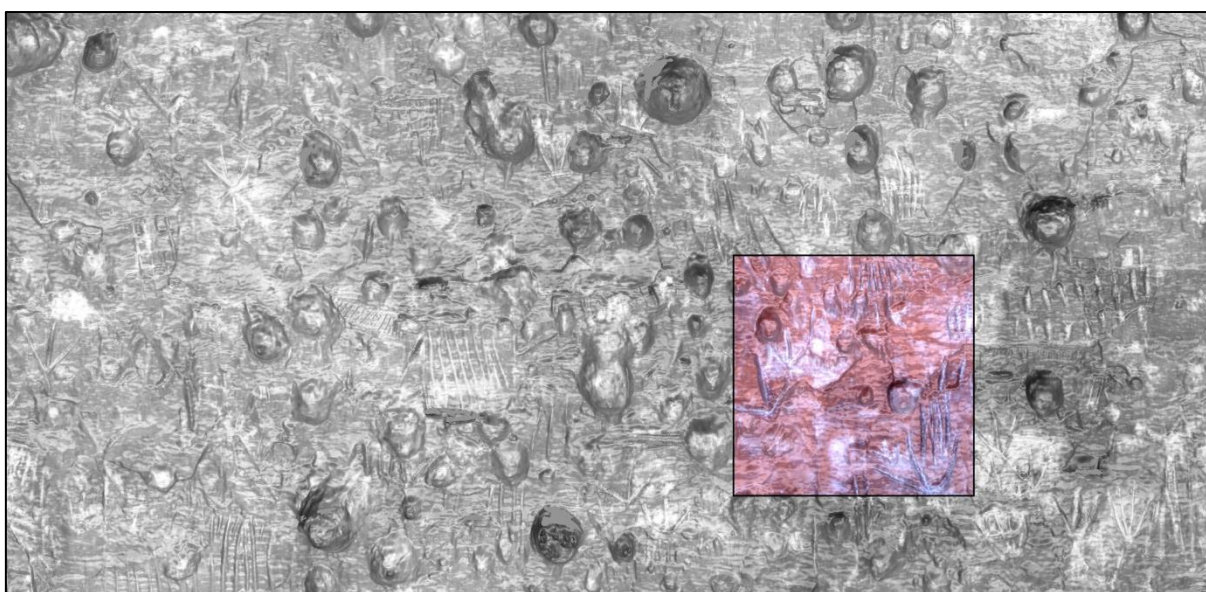


captura 640 x 480 pontos (aproximadamente 300.000) com coordenadas x, y e z, por varredura, com resolução variando em função da distância até o objeto. Foi delimitada uma área de interesse de aproximadamente 3,5 m de largura por 2,2 m de altura, na qual foi adquirida a maior parte dos petróglifos da Pedra Grande. O scanner capturou uma profundidade de 1,2 m em referência a um plano vertical tangente a pedra. Essa profundidade se deve a uma inclinação da pedra para dentro, na sua parte inferior, formando um abrigo. As nuvens de pontos capturadas foram tratadas com a utilização do software Geomagic Studio que no final resultou em uma malha de 12,8 milhões de triângulos (POHLMANN et al. 2012).

Da área total digitalizada foi escolhida uma área de interesse, quadrada, de 400 x 400 mm. Para fins de usinagem dividiu-se a área escolhida em 4 mosaicos de 200 x 200 mm devido a três razões: Dimensões máximas de usinagem da fresadora do LdSM; Tempo gasto na usinagem (possibilidade de iniciar e terminara usinagem no mesmo dia); Desgaste de ferramentas (evitar troca no meio da operação). Os mosaicos foram identificados como 1, 2, 3 e 4, sendo 1 o superior esquerdo, 2 o superior direito, 3 o inferior esquerdo e 4 o inferior direito.

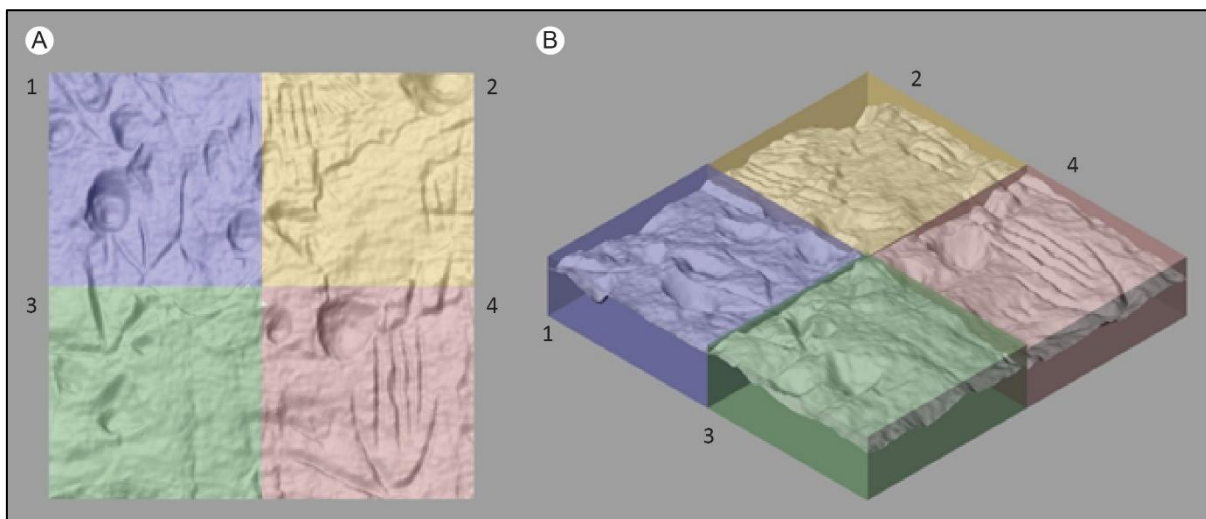
A imagem digitalizada da Pedra Grande com a área de interesse destacada pode ser vista na figura 62 e a imagem da área escolhida para a usinagem, com a identificação dos mosaicos, na figura 63.

**Figura 62 - Área digitalizada da Pedra Grande com a área de interesse destacada**



Fonte: Adaptado de LdSM – UFRGS (2010)

**Figura 63 - Área digitalizada da Pedra Grande escolhida para usinagem com a identificação dos mosaicos. Vista superior (A) e isométrica (B)**



### 3.4.2 Usinagem de Protótipo em MDF

As inscrições da Pedra Grande foram usinadas no LdSM utilizando uma fresadora CNC Tecnodrill Digimill 3D e a programação foi realizada no software Edgecam 2016.

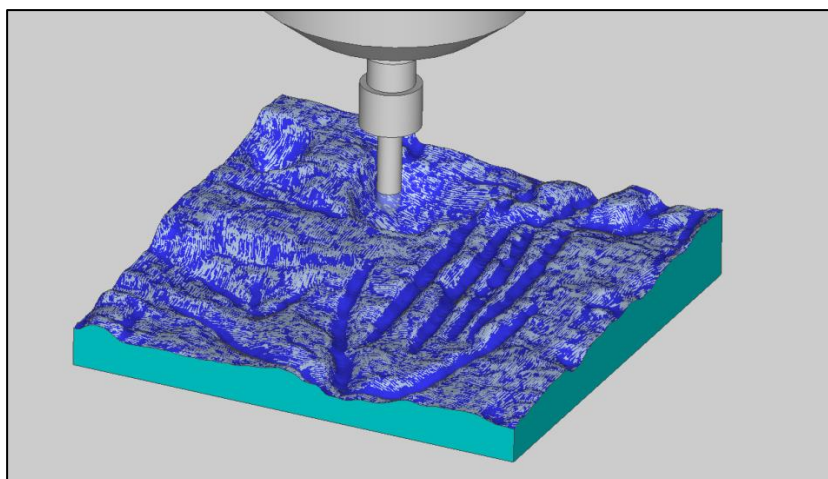
Os mosaicos foram primeiramente usinados em MDF e posteriormente em arenito. A exemplo da estela usinada preliminarmente (item 3.1), esta ação foi feita por duas razões. A primeira para observar se as estratégias de usinagem foram corretamente definidas, pois ao usinar MDF (que é de mais fácil usinagem que o arenito) pode-se acompanhar os caminhos que a ferramenta percorre, as aproximações e os demais deslocamentos utilizando ferramentas de metal duro, preservando as ferramentas de diamante que apresentam custo bem mais elevado. A segunda razão foi obter um modelo em um material de boa usinabilidade, no mesmo equipamento e com as mesmas estratégias de usinagem, apenas mudando velocidades de avanço, para poder servir como padrão de comparação com o objeto usinado em arenito. Assim, o objeto usinado em MDF também serve como padrão de comparação com o modelo digital obtido da Pedra Grande. Os parâmetros de usinagem utilizados para o MDF e para o arenito foram os mesmos, com exceção do material da ferramenta e das velocidades de deslocamento, que para o MDF foi dez vezes mais alta que para o arenito. O MDF foi usinado com ferramentas de metal duro e o arenito com ferramentas de PCD.

A estratégia de usinagem para todos os mosaicos foi a mesma: Uma operação de faceamento com fresa de topo de ponta reta de 12 mm de diâmetro,

uma operação de desbaste utilizando a mesma fresa, uma operação de acabamento utilizando fresa de topo de ponta esférica de 10 mm de diâmetro e uma operação de acabamento final utilizando fresa de topo de ponta esférica de 6 mm de diâmetro.

A figura 64 mostra uma simulação da usinagem do mosaico 4 em MDF, nela está sendo efetuada uma operação de acabamento. Esta imagem foi obtida do software Edgecam durante a programação e simulação do processo de usinagem. A simulação é um recurso do software que permite acompanhar os trajetos e aproximações das ferramentas e com isto prever e solucionar possíveis problemas que poderiam ocorrer na usinagem real. Os parâmetros de usinagem utilizados e as especificações das ferramentas estão no quadro 6.

**Figura 64 – Simulação da usinagem do mosaico 4 em MDF**



**Quadro 06 – Operações, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados na confecção do protótipo em MDF**

	Faceamento	Desbaste	Acabamento 1	Acabamento 2
<b>Ferramenta</b>	Pastilha de Metal Duro		Fresa de topo de Metal Duro de ponta esférica	Fresa de topo de Metal Duro de ponta esférica
<b>Diâmetro (mm)</b>	12	12	10	6
<b>Vel. de Rotação (rpm)</b>	15.000	15.000	15.000	20.000
<b>Profundidade de Corte (mm)</b>	1	1	*CAM	*CAM
<b>Penetração de trabalho (mm)</b>	6	6	1	0,6
<b>Vel. Avanço Lateral (mm/min)</b>	4.000	4.000	4.000	4.000
<b>Vel. Avanço Vertical (mm/min)</b>	400	400	400	400

\* CAM – A penetração de trabalho para estes casos foi definida automaticamente pelo software Edgecam em função da estratégia de usinagem selecionada na programação.

### 3.4.3 Usinagem da Réplica da Pedra Grande em Arenito

Depois de avaliada a usinagem dos mosaicos em MDF partiu-se para a usinagem em arenito. A estratégia de usinagem utilizada foi praticamente a mesma para todos os mosaicos. A única diferença foi em relação à operação de desbaste que no primeiro mosaico usinado (4) utilizou-se profundidade de corte de 1 mm por passe e nos demais de 2 mm por passe. Esta ação foi tomada para diminuir o tempo de usinagem, pois notou-se, experimentalmente, que esta prática é possível, porém, compromete um pouco a usinagem das bordas. Neste caso, a estratégia de usinagem necessitou ser na direção de fora da peça para dentro, para minimizar o problema. Este assunto é discutido na apresentação dos resultados. Os parâmetros de usinagem e as especificações das ferramentas utilizadas estão no quadro 7.

**Quadro 07 – Operações, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados na confecção da Réplica em Arenito**

	Faceamento	Desbaste	Acabamento 1	Acabamento 2
<b>Ferramenta</b>	Pastilha de PCD Sandvik R390–11T304E P4–NL–CD10		Fresa Wirutex de PCD de ponta esférica D.10X7 H10X35 CT55 Z2R5 FR-FU-R-DX	Fresa Wirutex de PCD de ponta esférica D.6X7 H6X35 CT55 Z1R3 FR-FU-R-DX
<b>Diâmetro (mm)</b>	12	12	10	6
<b>Vel. de Rotação (rpm)</b>	15.000	15.000	15.000	20.000
<b>Profundidade de Corte (mm)</b>	1	2*	CAM**	CAM**
<b>Penetração de trabalho (mm)</b>	6	6	1	0,6
<b>Vel. Avanço Lateral (mm/min)</b>	400	400	1.000	1.000
<b>Vel. Avanço Vertical (mm/min)</b>	40	40	100	100

\* Para o mosaico 4 foi usado 1 mm

\*\* A penetração de trabalho para estes casos foi definida automaticamente pelo software Edgcam em função da estratégia de usinagem selecionada na programação.

O material foi coletado na pedreira com a espessura de 70 mm e posteriormente foi serrado nas dimensões externas ficando com 200 x 200 x 70 mm (figura 65).

**Figura 65 - Bloco de arenito coletado na pedreira e serrado nas dimensões externas**

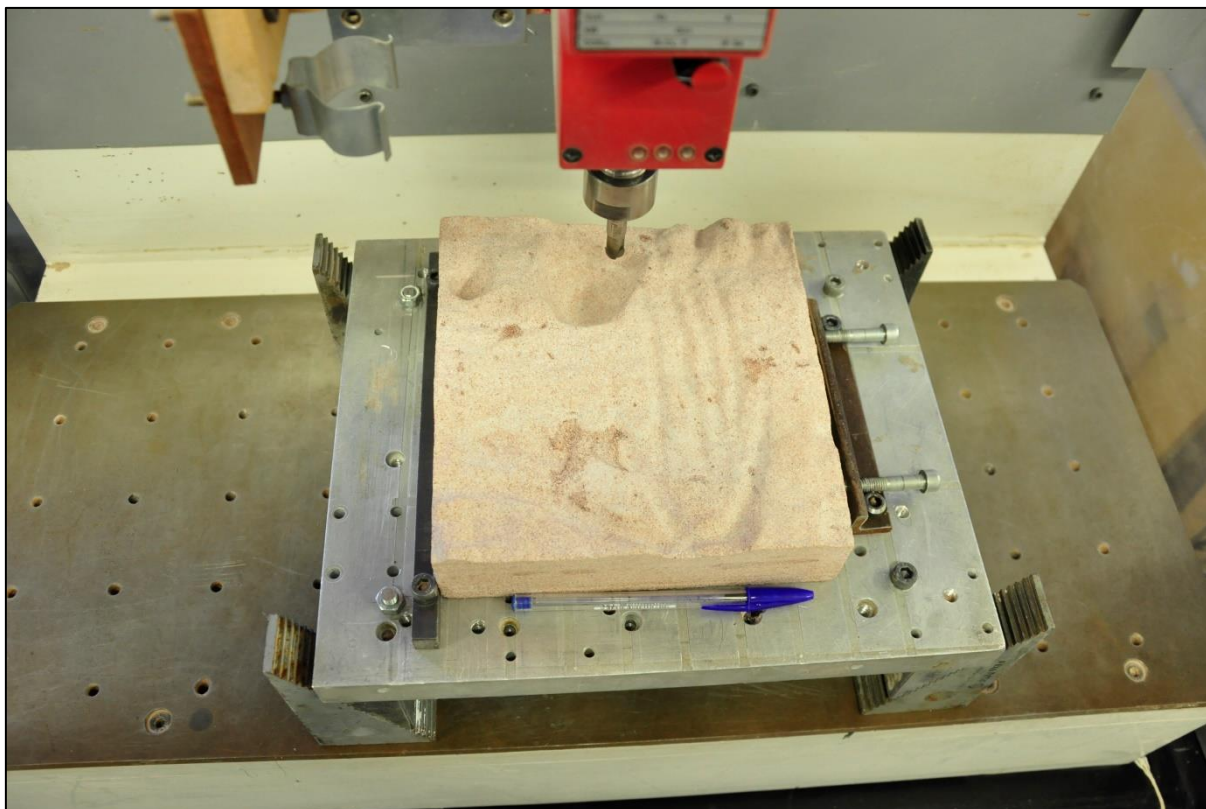


Primeiramente, foi feita uma operação de faceamento na qual foi retirado aproximadamente 1 mm na altura do bloco, para ter uma superfície plana de referência. A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo de ponta reta de 12 mm de diâmetro com insertos intercambiáveis de PCD (figuras 54 e 55, pág. 102). Com essa ferramenta, em seguida, foi feita também a operação de desbaste.

Posteriormente, foi feita uma operação de acabamento utilizando uma fresa de topo de ponta esférica de PCD de 10 mm de diâmetro (figura 53, pág. 102). Por fim, a operação de acabamento final foi realizada utilizando uma fresa de topo de ponta esférica de PCD de 6 mm de diâmetro (figura 52, pág. 101).

A figura 66 apresenta o processo de fresamento CNC do arenito. A título de ilustração, é apresentada a primeira operação de acabamento do mosaico 4, com a ferramenta de 10 mm.

**Figura 66 – Fresamento CNC do mosaico 4 em arenito**



#### **3.4.4 Avaliação da geometria e das dimensões das réplicas**

Após a usinagem foram digitalizados todos os mosaicos usinados em MDF e em Arenito. A avaliação da geometria e das dimensões das réplicas usinadas foi feita com a utilização da digitalização tridimensional a Laser por holografia conoscópica. Para tanto, utilizou-se um scanner Tecnodrill Digimill 3D com cabeçote digitalizador Conoprobe 1000. A lente utilizada foi de 100 mm, que confere exatidão (eixo z) de 0,015 mm, e o espaçamento entre os pontos capturados foi de 0,1 mm (eixos x e y). Os dados obtidos foram tratados com a utilização dos Softwares Geomagic Studio e Qualify nos quais fez-se a comparação da digitalização dos objetos usinados com a digitalização 3D original da Pedra Grande. A comparação da réplica em arenito com o objeto original foi feita para avaliar a precisão do método de reprodução utilizado.

#### **3.4.5 Avaliação do desgaste das ferramentas de PCD utilizadas na usinagem da réplica em arenito**

O desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem das réplicas foi avaliado

por fotografia em lupa estereoscópica e por digitalização tridimensional a laser por holografia conoscópica. As imagens e digitalizações foram feitas antes e depois da usinagem dos mosaicos da Réplica da Pedra Grande e comparadas entre si. As imagens obtidas pela lupa estereoscópica foram colocadas lado a lado (sem uso e após usinagem) para avaliação visual do desgaste. Os dados obtidos na digitalização 3D foram tratados pelos softwares Geomagic Stúdio e Qualify, com os quais fez-se a comparação das geometrias antes e depois da usinagem e apresentou-se o resultado do desgaste das ferramentas em imagens tridimensionais.

Para a avaliação do desgaste das fresas de topo de ponta esférica, utilizadas nas operações de acabamento, além das imagens obtidas na lupa estereoscópica também se utilizou imagens tridimensionais com padrões de cores relacionadas com as dimensões. Isto é um recurso do software Geomagic Qualify que foi utilizado para facilitar a interpretação dos resultados, pois neste caso, os desgastes foram pequenos e para isto este recurso é muito útil.

É importante ressaltar que para digitalizar as ferramentas houve a necessidade de desenvolver um método para solucionar o problema de reflexão do laser na superfície do diamante PCD, de modo a tornar a superfície opaca. Os métodos tradicionais para solucionar este problema consistem em recobrir a superfície com uma camada de talco ou pó revelador para líquidos penetrantes. Porém, com o uso de pós de revestimento há alteração dimensional da peça. Assim, foi proposto o recobrimento da superfície com pulverização catódica (sputering) de ouro. Para tanto foi utilizado o equipamento Balzers SCD 050. Os resultados da pesquisa sobre os revestimentos foram publicados no periódico *Advances in Mechanical Engineering* sob o título *Effects of diferente coating materials on three-dimensional optical scanning accuracy* (PEREIRA, PENZ e SILVA, 2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios descritos no capítulo 3. Faz-se uma análise e discussão destes resultados, confrontando os com a literatura revisada no capítulo 2.

### 4.1 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

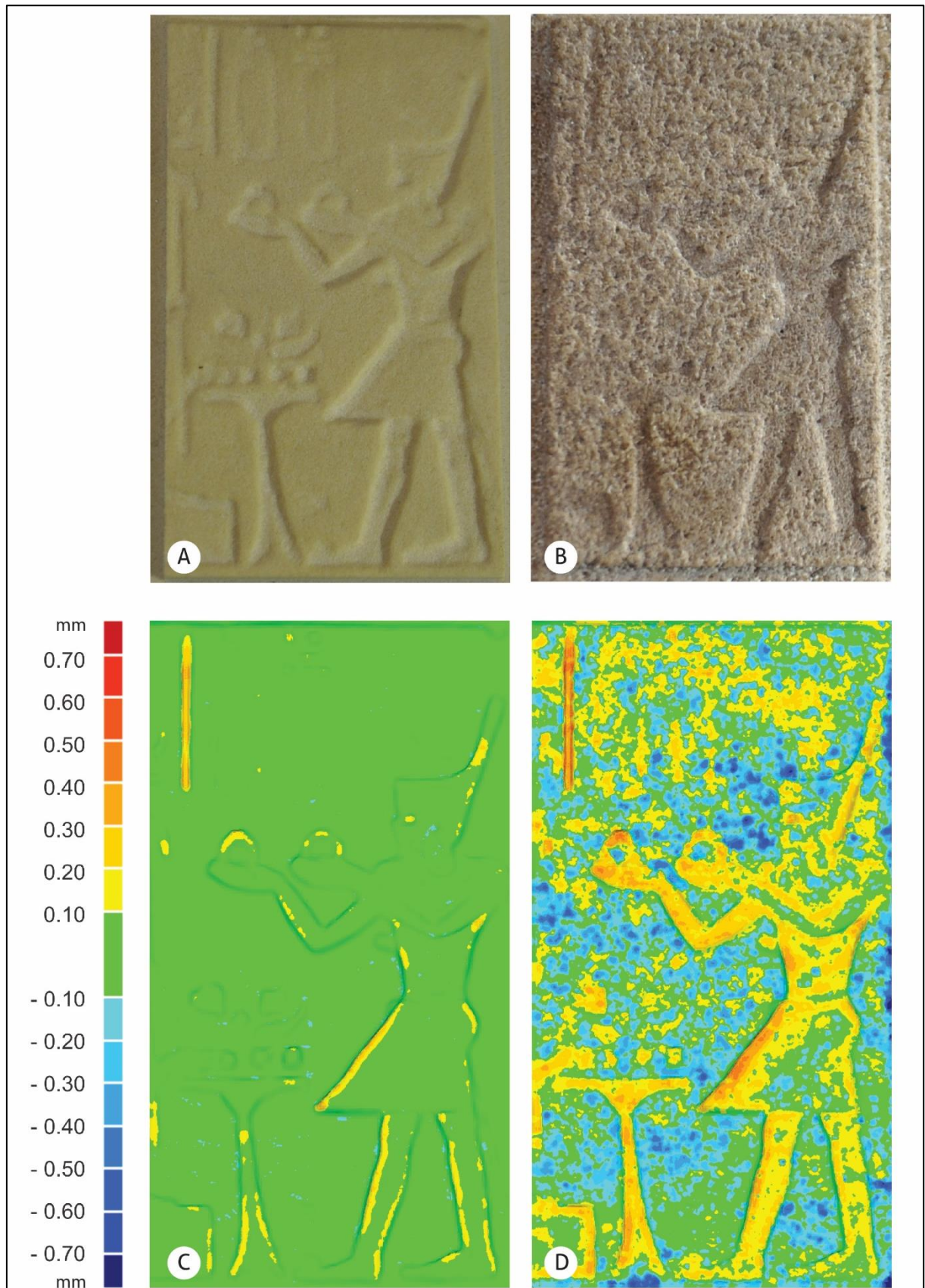
Os primeiros resultados, tanto sobre desgaste de ferramentas como da qualidade da usinagem, foram avaliados apenas de forma visual, pois neste momento o interesse era apenas avaliar a viabilidade do método. As ferramentas utilizadas para a usinagem da estela egípcia sofreram desgaste visível a olho nu, mas permitiram a usinagem da mesma. Visualmente, a superfície usinada ficou semelhante à que deu origem, o que foi positivo, pois indicou que o método era viável esteticamente.

Em um segundo momento, as peças obtidas foram digitalizadas para avaliação dimensional. A figura 67 mostra a estela com 30% do tamanho real usinada em Renshape® 460 (A) e em arenito (B) e os resultados da comparação dos modelos usinados com o original. Esses resultados foram publicados em dois capítulos de livro (BRANCAGLION JUNIOR, A. et al., 2013 e PEREIRA; KINDLEIN JUNIOR e SILVA, 2015).

A análise feita com o auxílio do software Geomagic Qualify mostra uma variação dimensional média de 0,03 mm com um desvio padrão de 0,04 mm para a usinagem do Renshape® 460 (figura 67C). Já para o arenito (figura 67D), mostra que as variações dimensionais ficaram com média de 0,12 mm e desvio padrão de 0,15 mm. As variações dimensionais positivas representam limitações do processo e de ferramentas, pois o menor raio interno possível de se obter com as ferramentas utilizadas foi 1 mm, logo toda geometria com raio interno menor que 1 mm aparece como erro. Já as variações dimensionais negativas são atribuídas à rugosidade do material, por esta razão elas são evidentes apenas na réplica em Arenito. Após os ensaios preliminares, pode-se estimar uma tolerância dimensional de 0,3 mm mais o raio da ferramenta utilizada no processo.



Figura 67 – Réplica usinada com 30% do tamanho natural, em Renshape® 460 (A) e em Arenito (B), comparação da réplica com a obra original, em Renshape® 460 (C) e em Arenito (D)



Fonte: Adaptado de PEREIRA; KINDLEIN JUNIOR e SILVA, (2015)

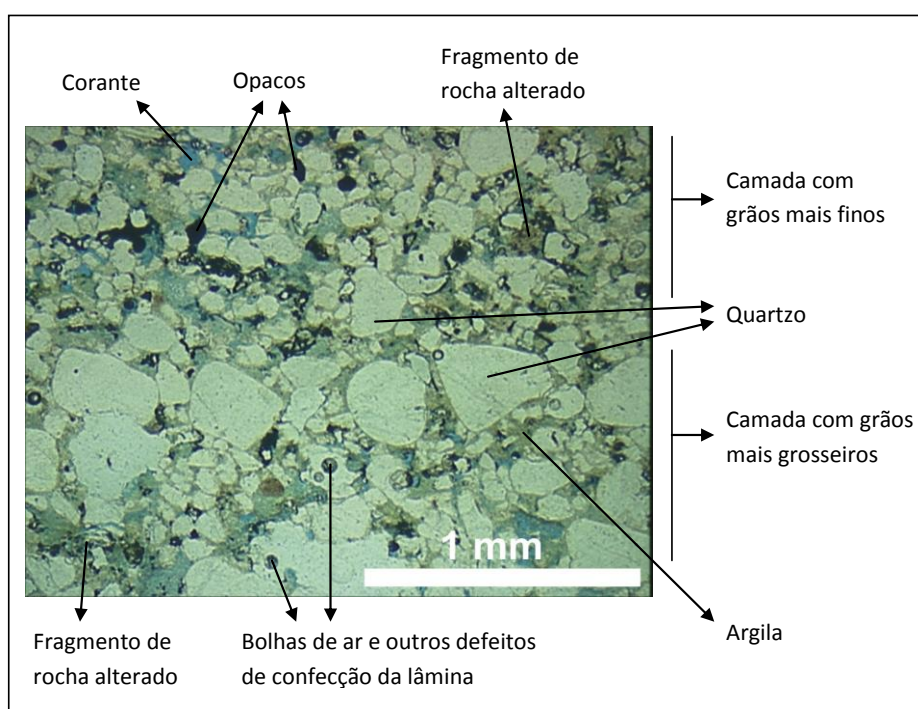
## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ARENITO

A síntese dos resultados da petrografia, das análises de raios X e dos ensaios físicos e mecânicos efetuados para a caracterização do arenito é apresentada a seguir.

### 4.2.1 Petrografia da Rocha

A análise petrográfica foi feita com auxílio do Laboratório de Gemologia do Instituto de Geociências da UFRGS. A Figura 68 é uma fotomicrografia em luz natural da rocha estudada (aumento de 25 vezes), aqui denominada de lâmina A. Essa imagem mostra que a rocha é imatura texturalmente, constituída por uma mistura de grãos de areia com intervalo granulométrico variando desde areia muito grossa (intervalo granulométrico de 1,0 a 2,0 mm) até areia fina (0,250 a 0,125 mm), ligados por uma massa argilosa, exibindo um grau de cimentação médio, o que a deixa um pouco friável em amostras de mão. Os grãos exibem um grau de arredondamento médio a alto, indicando um transporte relativamente longo. Os clastos são predominantemente de quartzo, observando-se ainda minerais opacos e mais raramente alguns fragmentos de rocha muito alterados.

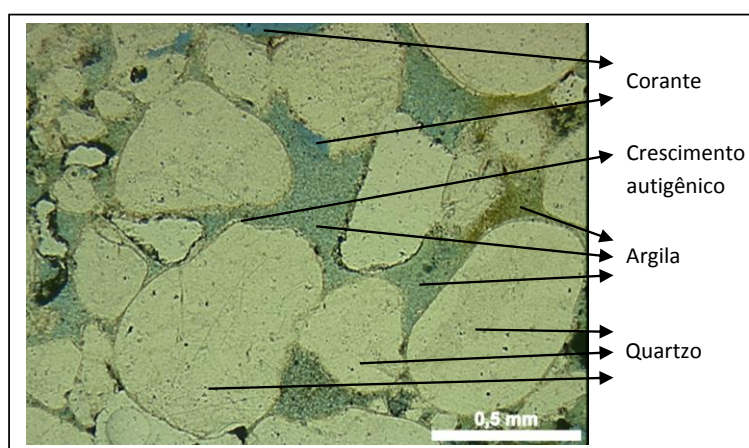
**Figura 68 – Lâmina A, imagem da rocha ao microscópio petrográfico**



Embora de difícil identificação, observa-se um fraco crescimento autigênico nos grãos de quartzo (autigênese)<sup>11</sup>, melhor identificáveis com uma ampliação maior, observável na lâmina B (figura 69), que é um detalhe desta lâmina. A figura 68 mostra na parte superior um nível com grãos mais finos e na parte inferior, um nível com grãos mais grosseiros; a parte superior corresponde a um nível de deposição composto de grãos de quartzo no tamanho de areia média a fina, com alguns grãos de areia grossa, subarredondados a subangulosos; e na parte inferior, um nível composto de grãos de quartzo arredondados no tamanho areia grossa, misturados com grãos subarredondados a angulosos de areia média a fina. Entre os grãos de quartzo, que são predominantes nos dois níveis, observa-se argila (massas de cor castanha) e áreas preenchidas por um corante (cor azul), onde a argila foi extraída durante a confecção da lâmina, além de alguns grãos de minerais opacos (provavelmente hematita) e, mais raro, fragmentos de rocha muito alterada. Por toda a lâmina observam-se, dispersos, defeitos da confecção da lâmina - bolhas de ar e manchas irregulares.

A figura 69, lâmina B, mostra um detalhe da lâmina A com aumento de 50 vezes, mostrando os grãos de quartzo maiores (areia grossa) arredondados e alguns grãos de quartzo subarredondados no tamanho areia média a fina. Observa-se que em algumas partes a argila absorveu um pouco do corante, ficando azulada.

**Figura 69 – Lâmina B, detalhe da lâmina A**



---

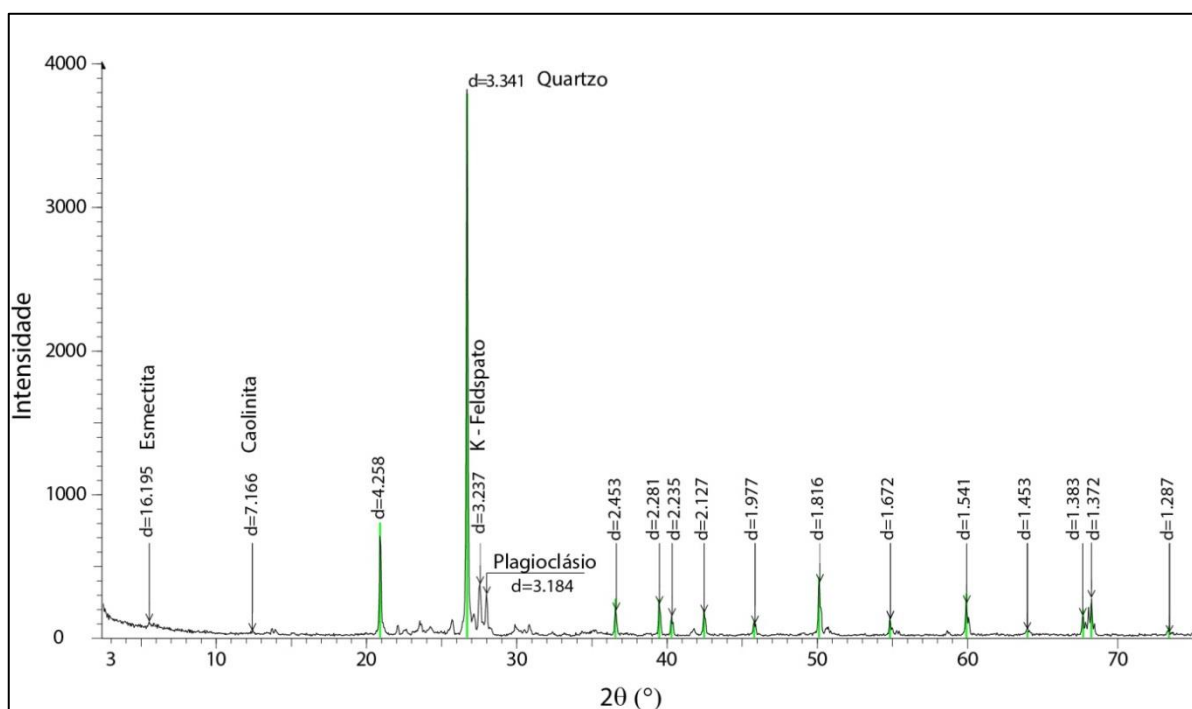
Autigênese<sup>11</sup> é a cristalização de um mineral durante o processo diagenético que pode ou não atuar como cimento. Um crescimento autigênico ocorre quando um mineral pré-existente é submetido a um crescimento secundário em um processo de autigênese. Crescimento secundário de quartzo sobre quartzo é um exemplo.

#### 4.2.2 Análise por Difração de Raios X

A partir do difratograma de raios X (figura 70), confirmou-se com uma análise semiquantitativa a predominância de quartzo, 48%, seguido de K-feldspato, 25,7 % e de plagioclásio, 19,3 %. Em menor quantidade também foram encontrados esmectita, 4,4%, e caolinita, 2,6 %.

No difratograma de raios X, os picos são indicados através de seus valores de “d”, sendo o pico mais intenso de cada fase indicado com o nome. Os demais picos indicados apenas com o valor de “d” se referem ao quartzo, componente predominante. A tabela 15 mostra as fases componentes e uma aproximação semiquantitativa do percentual de cada fase.

**Figura 70 – Difratograma de amostra do arenito estudado neste trabalho**



**Tabela 15 - Fases identificadas e aproximação semiquantitativa**

FASE	APROXIMAÇÃO SEMIQUANTITATIVA (%)
Esmectita	4,4
Caolinita	2,6
Quartzo	48,0
K-Feldspato	25,7
Plagioclásio	19,3

### 4.2.3 Análise por Fluorescência de Raios X

Para melhor investigar os elementos presentes na rocha, foi realizado um ensaio de fluorescência de raios X. Pode-se inferir uma quantidade de aproximadamente 70% de SiO<sub>2</sub>, além de 15% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 7% de K<sub>2</sub>O e 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> conforme mostrado na tabela 16.

**Tabela 16 - Análise do ensaio de fluorescência de Raios X de uma amostra do arenito estudado**

Componente	Presença (%)
SiO <sub>2</sub>	71,2819
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,8480
K <sub>2</sub> O	7,2628
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2138
CaO	0,6829
TiO <sub>2</sub>	0,6789
MgO	0,2239
Na <sub>2</sub> O	0,2170
BaO	0,2095
MnO	0,1443
SO <sub>3</sub>	0,0798
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0731
ZrO <sub>2</sub>	0,0409
Rb <sub>2</sub> O	0,0222
SrO	0,0210

Com base na petrografia e nos ensaios de difração e fluorescência de raios X, esta rocha pode ser classificada como Arenito Arcóσιο, baseado na classificação de Petijohn, quadro 1 (pág. 33), na descrição de Sgarbi (pág. 32), na tabela 1 (pág. 36) e no quadro 2 (pág. 35). O fato de não se ver feldspato no microscópio é porque muitos deles já se alteraram quimicamente para argilo-minerais e, ainda, muita da argila que se vê na lâmina, pode ser feldspato (K-feldspato e plagioclásio) no tamanho argila (e não argilo-minerais como esmectita e caolinita); por isso a difratometria de raios X mostra esse teor relativamente alto de feldspatos, que não foram identificados na lâmina delgada.

### 4.2.4 Ensaio Físicos e Mecânicos

As médias dos resultados do ensaio de compressão triaxial são mostradas na tabela 17, relacionando com a tensão de confinamento ensaiada. Também nesta tabela são mostrados os valores médios do Módulo de Elasticidade nas condições do ensaio. Na tabela 18 são apresentados dados da rocha obtidos por cálculos, pelo

software RockData para o maciço rochoso a partir dos dados dos ensaios, para amostras a 45° da estratificação e para amostras perpendiculares à estratificação do arenito.

**Tabela 17 - Resultados médios do Ensaio de Compressão Triaxial para cada litotipo e tensão confinante**

Tensão confinante $\sigma_3$ (MPa)	Arenito 45°		Arenito perpendicular	
	Tensão obtida no ensaio $\sigma_1$ (MPa)	Módulo de elasticidade E (GPa)	Tensão obtida no ensaio $\sigma_1$ (MPa)	Módulo de elasticidade E (GPa)
2	47,06	10,74	55,52	13,63
5	70,12	11,07	71,90	10,30
7	76,91	12,08	81,71	10,20

Os resultados mostraram aumento da tensão axial (resistência) com o aumento da tensão de confinamento, o que mostra que eles atendem a tendência esperada para este tipo de ensaio.

**Tabela 18 - Dados obtidos no Ensaio Triaxial pelo RockData**

Amostra	Tensão de Compressão Uniaxial (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Poisson	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito (°)	mi
45°	30,491	98.194,20	0,25	5,313	50,36	19,96
Perpendicular	42,142	115.440,33	0,25	7,492	48,06	12,851

Os ensaios mostraram que a tensão de compressão uniaxial foi de aproximadamente 30 MPa para o arenito a 45° e aproximadamente 42 MPa para o arenito perpendicular à estratificação. Estes valores, comparados com a tabela 4 (pág. 47), ficaram um pouco acima do arenito I ( $\geq 60\%$  sílica livre) e abaixo do arenito II ( $\geq 90\%$  sílica livre), mas próximo do arenito I, que apresenta teor de sílica semelhante ao do arenito em estudo.

Os ensaios de Tração Indireta (Ensaio Brasileiro) mostraram que as amostras de arenito 45° possuem resistência média à tração de 1,94 MPa com desvio padrão de 0,37 MPa e as amostras perpendiculares possuem resistência média de 1,41 MPa com desvio padrão de 0,16 MPa. Os resultados do Ensaio de Flexão mostraram que as amostras possuem resistência média de 16,34 Mpa, com desvio

padrão de 3,53 MPa.

Os resultados da análise das propriedades físicas estão na tabela 19. Nela, observa-se os valores de densidade, porosidade e absorção de água.

**Tabela 19 - Propriedades físicas dos arenitos**

	Densidade aparente $\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade aparente (%)	Absorção de água aparente (%)	Umidade (%)
<b>Média</b>	<b>2.110,58</b>	<b>15,33</b>	<b>7,27</b>	<b>0,63</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>11,79</b>	<b>1,01</b>	<b>0,50</b>	<b>0,14</b>

As propriedades físicas de densidade aparente e absorção de água do arenito estudado foram respectivamente 2110,58 kg/m<sup>3</sup> e 7,27%. Comparando com a tabela 4 (pág. 47), nota-se que a densidade fica um pouco acima do arenito I ( $\geq 60\%$  sílica livre) e abaixo do arenito II ( $\geq 90\%$  sílica livre), mas próximo do arenito I, que tem teor de sílica semelhante ao arenito em estudo. Também a absorção de água fica entre os dois, mas se aproxima do arenito I. Os resultados completos se encontram no Apêndice A.

A média dos resultados da avaliação do Índice de Abrasividade Cerchar (CAI) do arenito ensaiado foi 1,22 com desvio padrão de 0,35. Segundo os parâmetros descritos nas normas, sua classificação (conforme tabela 7, pág. 62) é Abrasividade Média. Os resultados completos estão descritos no Apêndice B.

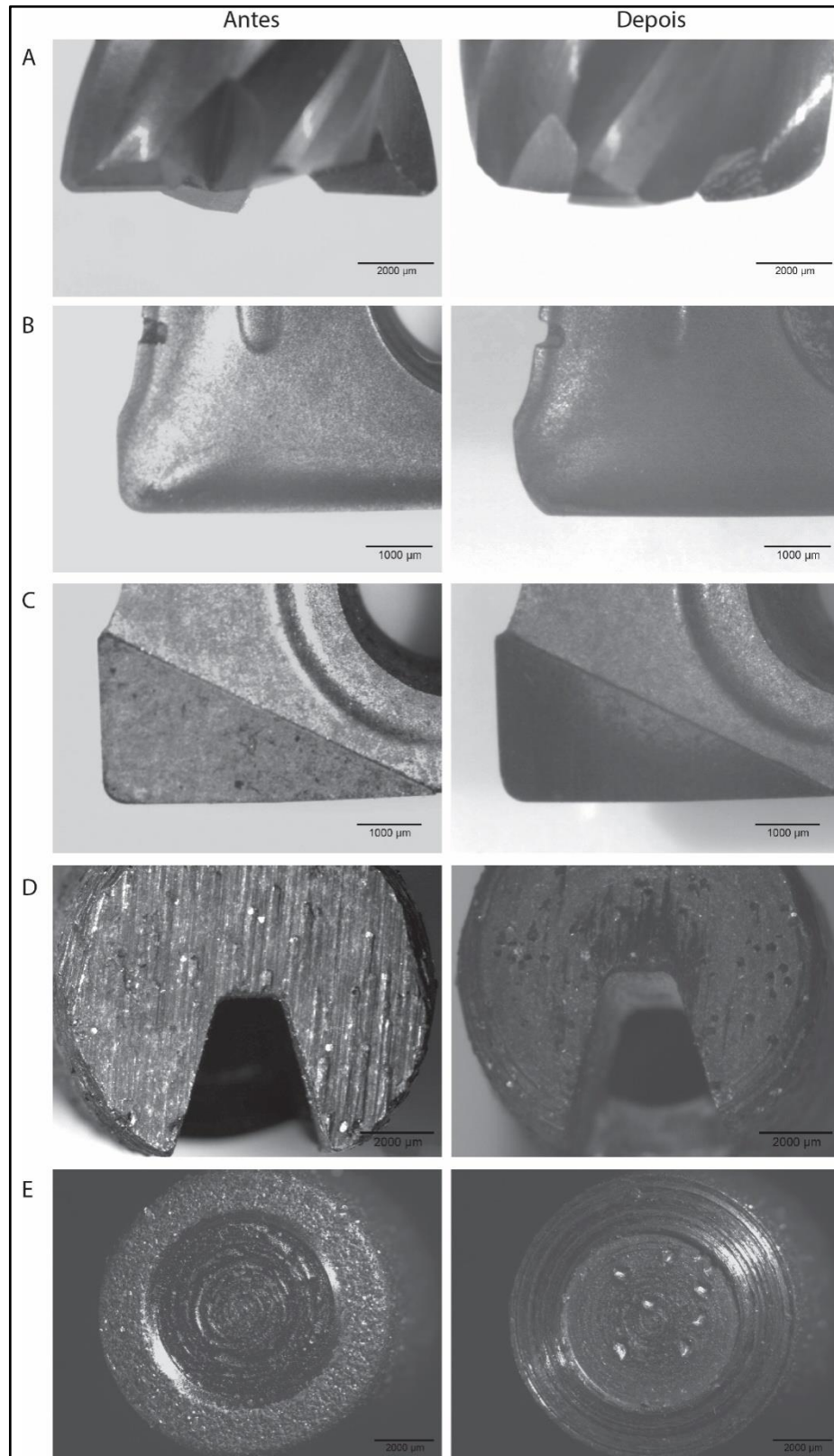
#### 4.3 ENSAIOS DE USINAGEM PARA DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE

Nesta etapa de ensaios foram usinados rasgos no arenito caracterizado com cinco ferramentas diferentes e utilizando os sentidos de corte concordante e discordante. Foi avaliado o desgaste das ferramentas, as rugosidades produzidas no material usinado e a granulometria dos cavacos gerados com cada ferramenta.

##### 4.3.1 Avaliação do desgaste das ferramentas

A figura 71 mostra imagens das ferramentas feitas em lupa estereoscópica, antes e depois dos ensaios. As imagens foram posicionadas uma ao lado da outra para facilitar a avaliação visual dos desgastes das ferramentas usadas em comparação com as ferramentas novas, sem uso.

Figura 71 - Imagens das ferramentas antes e depois do ensaio. A: Fresa inteira de Metal Duro, B: Pastilha de Metal Duro, C: Pastilha de PCD, D: Broca Diamantada, E: Ferramenta diamantada por eletrodeposição





A tabela 20 mostra dados de avaliação dimensional e perda de massa das ferramentas relacionadas com o volume de material removido. Observa-se que, como o início dos rasgos foi usinado com o diâmetro total de cada ferramenta, o volume removido foi ligeiramente diferente para cada uma delas. Ainda cabe observar que as ferramentas que não resistiram à usinagem dos dois rasgos (concordante e discordante) removeram a metade do volume de material esperado (correspondente a apenas um rasgo).

**Tabela 20 - Dados de desgaste das ferramentas ensaiadas**

	Ferramenta				
	Fresa Inteiriça de Metal Duro	Pastilha de Metal Duro	Pastilha de PCD	Broca Diamantada	Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição
Diâmetro da ferramenta (mm)	10	12	12	10	10
Desgaste na altura (mm)	1,4	0,4	-	-	0,4
Perda de Massa (g)	0,1155	0,0010	0,0006	0,0428	0,1311
Volume removido (cm <sup>3</sup> )	15*	34	34	30	15*

\* Ferramentas que não resistiram à usinagem dos dois rasgos.

A Fresa Inteiriça de Metal Duro apresentou desgaste acentuado. Perdeu toda a parte cortante já na fase inicial do ensaio, na execução do primeiro rasgo, não sendo possível usinar o segundo rasgo.

A Pastilha de Metal Duro, através da análise das fotografias, mostrou desgaste da ponta cortante. Dado o pequeno tamanho da única aresta de corte, a perda de massa foi pequena. Foi difícil fazer avaliação dimensional com exatidão utilizando o paquímetro porque o desgaste foi irregular, mas a parte mais desgastada foi de aproximadamente 0,4 mm.

A Pastilha de PCD, não mostrou sinais evidentes de desgaste. Esta ferramenta também não apresentou variação dimensional observada pela medição com paquímetro. A perda de massa também foi ínfima e, por isso, foi considerada a ferramenta de melhor desempenho.

A Broca Diamantada apresentou desgaste visível da matriz, ficando os grãos

de diamante mais expostos. Também foi notado desgaste de toda a ferramenta na região de intersecção da parte cilíndrica com a parte plana da ponta, desgastando o canto vivo, iniciando um pequeno arredondamento. Por análise dimensional, com paquímetro, não se notou variação da altura total da ferramenta. A perda de massa ficou na média entre as ferramentas com maiores e menores valores.

A Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição teve desgaste acentuado no topo, perdendo grande parte da camada de diamante e tornando-se inútil. Houve necessidade de usar outra ferramenta para usinar o segundo rasgo, pois a primeira ferramenta usinou o primeiro rasgo e não conseguiu terminar o segundo. Um novo rasgo, com nova ferramenta, foi realizado apenas para poder analisar a rugosidade das superfícies do rasgo com a condição de corte discordante.

#### 4.3.2 Avaliação das rugosidades

Os resultados das medições estão registrados na tabela 21. Nela mostra-se o resultado das médias dos valores de  $R_a$  no fundo e na lateral dos rasgos.

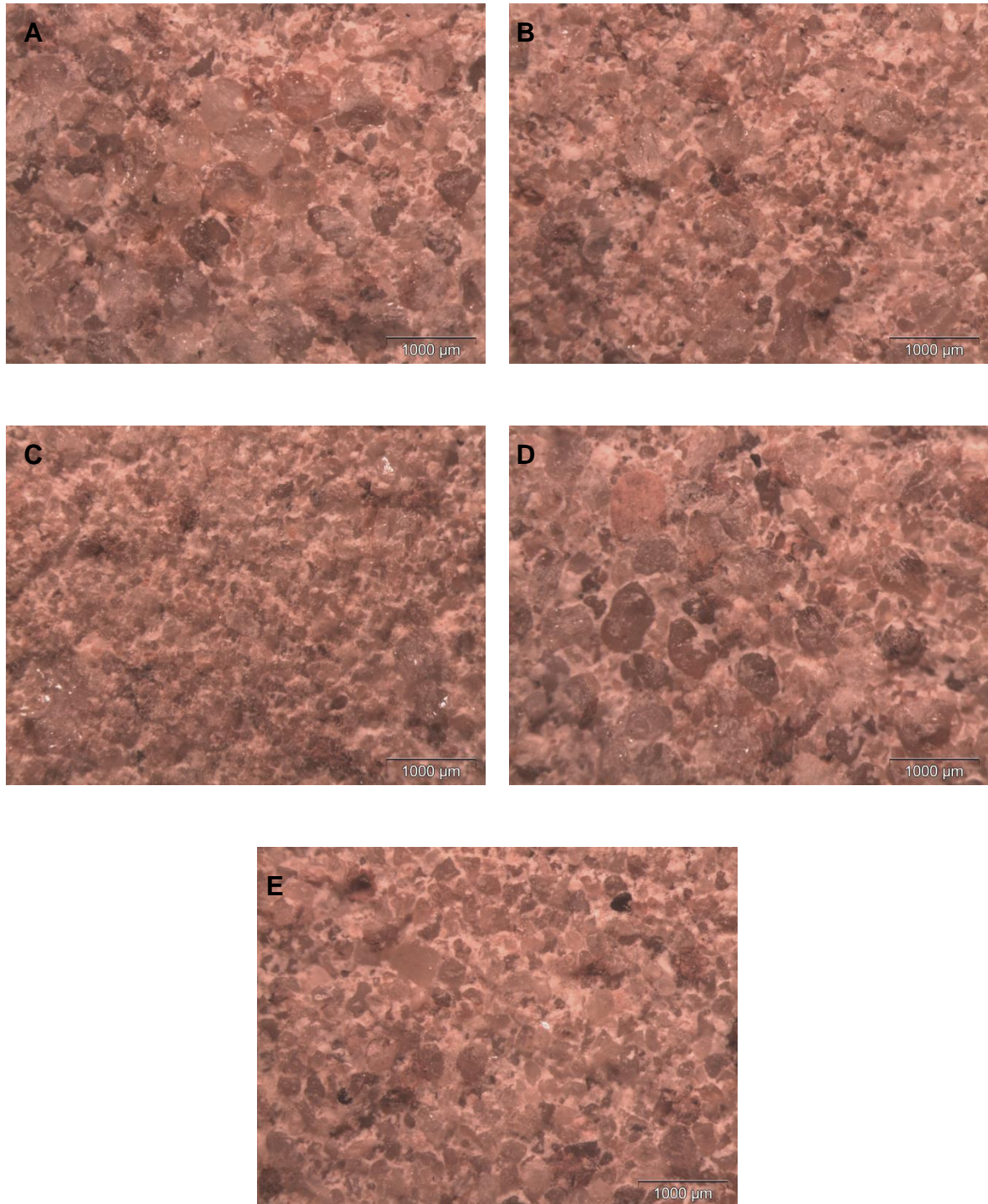
**Tabela 21 - Resultados das médias das medições das rugosidades superficiais dos nove rasgos usinados, pelo método da digitalização a Laser (cutoff = 2,5 mm)**

Média Aritmética das Medições da Rugosidade da Superfície em $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )				
Ferramenta	Usinagem com corte Concordante		Usinagem com corte Discordante	
	Fundo	Lateral	Fundo	Lateral
<b>Fresa inteira de Metal Duro</b>	32,8	51,6	-	-
<b>Pastilha de Metal Duro</b>	34,8	48,8	33,5	40,1
<b>Pastilha de PCD</b>	22,5	41,2	17,5	39,8
<b>Broca Diamantada Ferramenta</b>	28,8	44,3	28,6	43
<b>Diamantada por Eletrodeposição</b>	24,6	42,1	31	41,6

Observa-se que as rugosidades no fundo dos rasgos são sempre menores do que as rugosidades nas laterais. No corte concordante, pode-se observar que a rugosidade do fundo fica entre 50 e 70% da lateral. Embora os valores sejam muito próximos, no corte discordante as rugosidades ficaram ligeiramente menores, em

especial nas laterais usinadas pelas pastilhas de MD e PCD. As imagens das superfícies usinadas podem ser vistas na figura 72.

**Figura 72 – Imagens da superfície do arenito usinado**



(A) Fresa inteira de Metal duro, (B) Pastilha de Metal Duro, (C) Pastilha de PCD, (D) Broca diamantada, (E) Ferramenta diamantada por eletrodeposição

Pela observação dessas imagens pode-se notar que as superfícies usinadas com cada ferramenta apresentaram diferenças entre si. Tais diferenças se concentram no corte e arranque de grãos. Nota-se que a superfície usinada com a Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição aparenta ter o melhor acabamento, o que na análise das rugosidades se mostra com qualidade muito próxima da usinada pela Pastilha de PCD. Isto comprova as afirmações de Konstanty (2005) que grãos de diamante mais finos produzem melhor acabamento. Embora a Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição apresentasse bons resultados no tocante ao acabamento superficial, a mesma não pode ser usada na usinagem do arenito devido à curtíssima vida; ela perde muito rapidamente os grãos de diamante e, como a camada é fina, a vida da ferramenta acaba logo. Já a Pastilha de PCD produz melhor acabamento superficial e com desgaste muito pequeno.

Observando o fundo dos rasgos usinados, permite-se ver que nesta região os componentes do arenito, sendo a maioria grãos de quartzo, foram cortados numa mesma altura, sendo que muitos grãos foram arrancados. Era desejável que estes grãos fossem cisalhados no plano de corte do topo da ferramenta, mas isto não ocorreu, pois sabe-se que os grãos de quartzo apresentam um plano preferencial de corte chamado plano de clivagem, sendo separados nesta direção. Assim, os grãos de quartzo, estando posicionados de forma aleatória na matriz, foram cortados com inclinações diferentes resultando em superfícies rugosas.

Uhlmann e Manthei (2015), tópico 2.2.2 (pág. 74), em seus experimentos, chegaram à conclusão que para o arenito os parâmetros de usinagem não têm influência na forma dos cavacos gerados e nem na rugosidade das superfícies usinadas. Os autores afirmam que repetindo ensaios com os mesmos parâmetros de usinagem pode-se obter resultados diferentes tanto para a forma dos cavacos gerados como a rugosidade das superfícies usinadas. Os resultados obtidos neste estudo mostram que a pastilha de PCD produziu rugosidade menor que as demais ferramentas. Ainda, a pastilha de PCD gerou cavacos maiores, conforme apresentado a seguir.

#### **4.3.3 Avaliação da granulometria dos cavacos gerados por cada ferramenta**

A tabela 22 mostra o resumo dos resultados da granulometria dos cavacos gerados por cada ferramenta

Tabela 22 - Resumo dos resultados dos ensaios de granulometria

Ferramenta geradora	Diâmetro a 10%	Diâmetro a 50%	Diâmetro a 90%	Diâmetro médio
<b>Fresa Inteira de Metal Duro</b>	5,8 µm	62,6 µm	297,5 µm	107,5 µm
<b>Pastilha de Metal Duro</b>	8,7 µm	88,1 µm	430,2 µm	158,6 µm
<b>Pastilha de PCD</b>	11,0 µm	106,5 µm	516,3 µm	196,5 µm
<b>Broca Diamantada</b>	6,5 µm	63,9 µm	259,4 µm	101,4 µm
<b>Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição</b>	3,0 µm	28,2 µm	184,6 µm	66,3 µm

Pela análise dos resultados do ensaio de granulometria (diâmetro médio) é possível notar que os maiores tamanhos de cavacos foram gerados, respectivamente, pelas Pastilhas de PCD, pelas Pastilhas de Metal Duro e pela Ferramenta Inteira de Metal Duro, todas de geometria definida. Tais resultados estão de acordo com os estudos de formação de cavacos primários de Wagner (1971) e Reichenbacher (2010), conforme já apresentado na figura 25 (pág. 70).

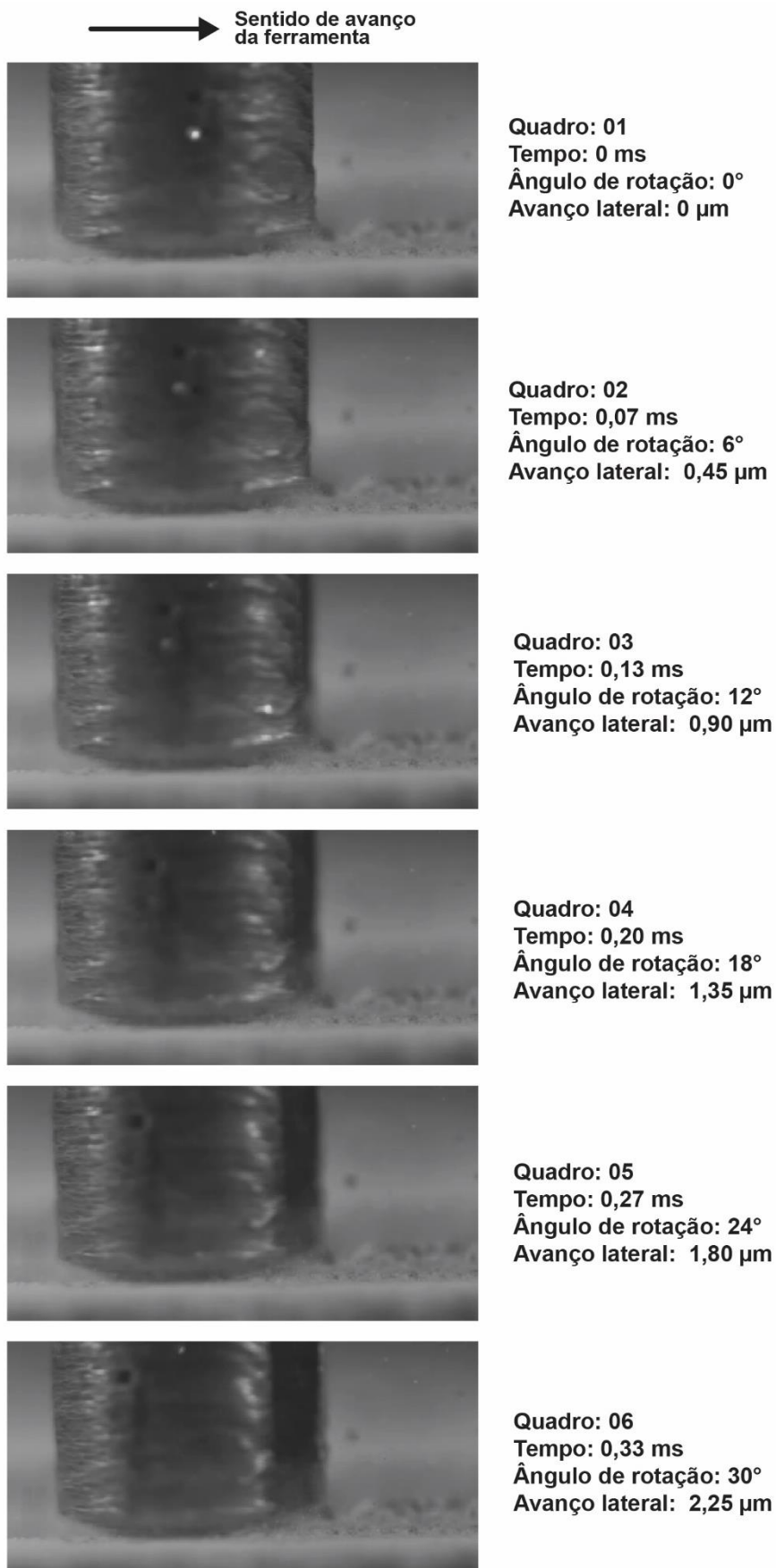
Pode-se também notar que o menor tamanho de cavacos foi gerado pela Ferramenta Diamantada por Eletrodeposição, o que parece lógico, pois esta ferramenta é composta de grãos finos de diamante (D126). Em geral, as ferramentas de geometria não definida foram as que apresentaram menor granulometria dos cavacos gerados e também maior desgaste (maior perda de massa, conforme tabela 20). Cabe destacar que estas ferramentas trabalham pelo princípio de abrasão e são projetadas para que, por meio do desgaste, novos grãos de diamante sejam expostos na superfície.

Vale ressaltar que a Fresa Inteira de Metal Duro foi uma exceção a essa relação com o desgaste. Como a ferramenta perdeu rapidamente a afiação, ela passou a ter uma parcela de abrasão. Visto que ela não pôde terminar todo o ensaio, o resultado da granulometria dos cavacos gerados por ela não foi conclusivo. Exatamente por esse grande e rápido desgaste, essa ferramenta não foi mais utilizada nos ensaios subsequentes.

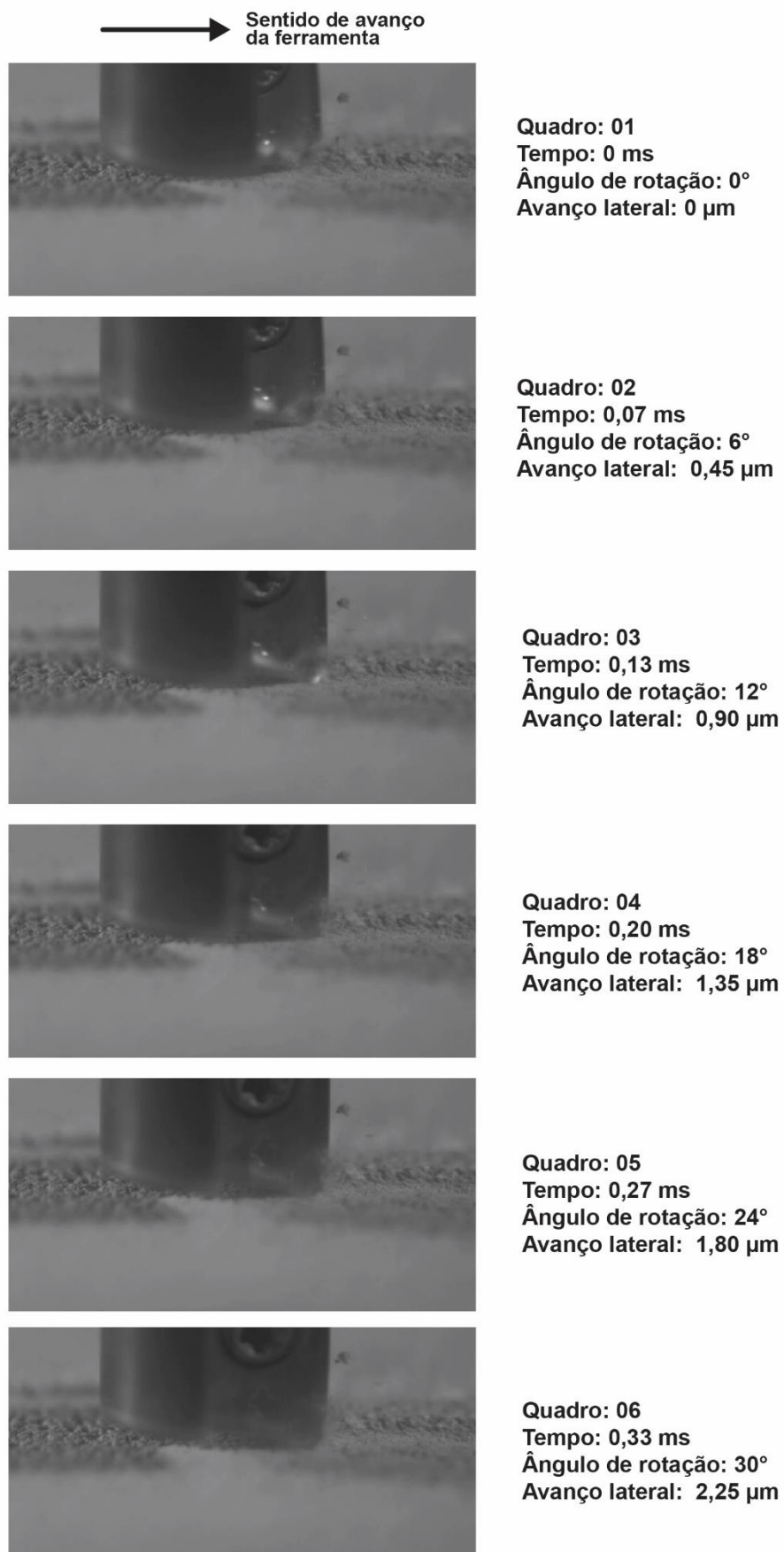
#### 4.4 ANÁLISE DO CORTE E GERAÇÃO DE CAVACOS

Os resultados dos ensaios de usinagem com câmera de alta velocidade, realizados com o objetivo da visualização da remoção do cavaco, podem ser visualizados nas figuras 73 a 77.

**Figura 73 - Broca Diamantada, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo**

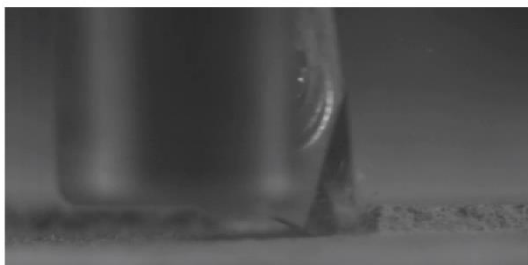


**Figura 74 - Pastilha de Metal Duro, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo**



**Figura 75 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo**

→ Sentido de avanço da ferramenta



**Quadro: 01**  
**Tempo: 0 ms**  
**Ângulo de rotação: 0°**  
**Avanço lateral: 0 µm**



**Quadro: 02**  
**Tempo: 0,07 ms**  
**Ângulo de rotação: 6°**  
**Avanço lateral: 0,45 µm**



**Quadro: 03**  
**Tempo: 0,13 ms**  
**Ângulo de rotação: 12°**  
**Avanço lateral: 0,90 µm**



**Quadro: 04**  
**Tempo: 0,20 ms**  
**Ângulo de rotação: 18°**  
**Avanço lateral: 1,35 µm**



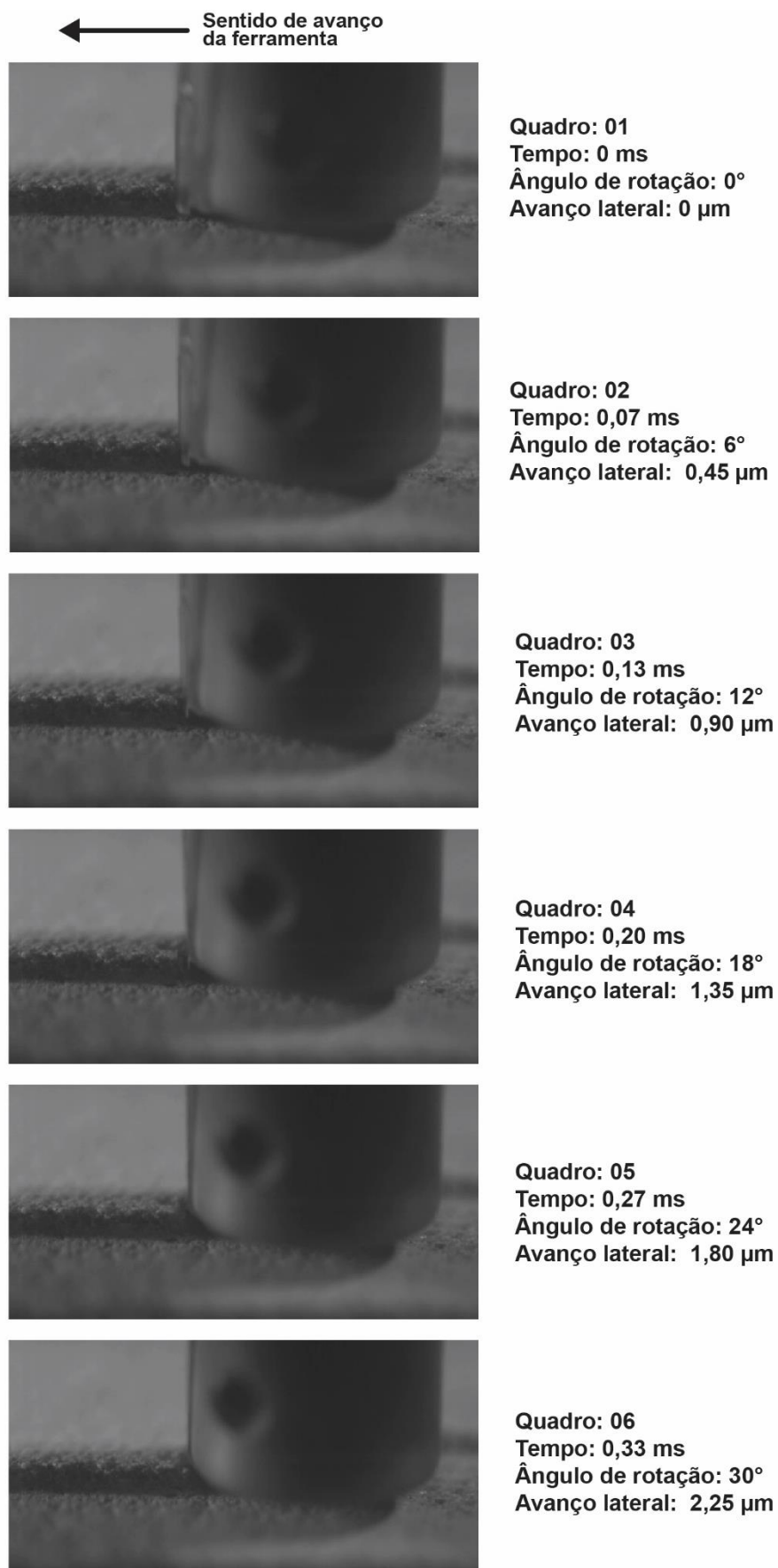
**Quadro: 05**  
**Tempo: 0,27 ms**  
**Ângulo de rotação: 24°**  
**Avanço lateral: 1,80 µm**



**Quadro: 06**  
**Tempo: 0,33 ms**  
**Ângulo de rotação: 30°**  
**Avanço lateral: 2,25 µm**

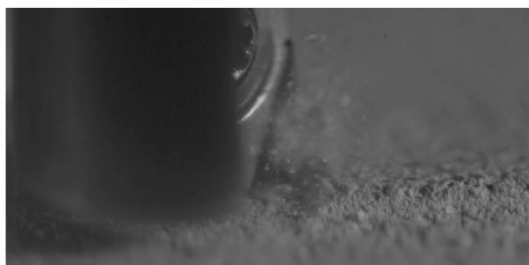


**Figura 76 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 400 mm/min, sentido de corte concordante, velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo**

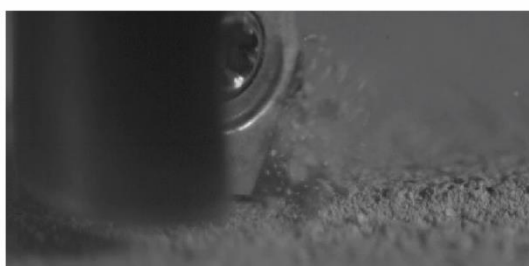


**Figura 77 - Pastilha de PCD, 15.000 rpm, velocidade de avanço de 2.000 mm/min, sentido de corte discordante, velocidade de captura de 12.000 quadros por segundo**

→ Sentido de avanço da ferramenta



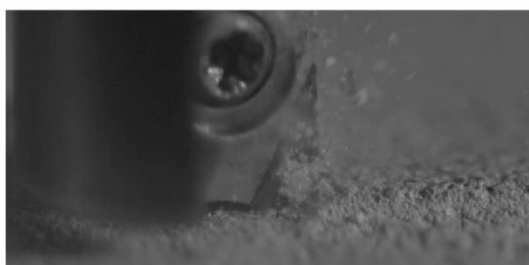
**Quadro: 01**  
**Tempo: 0 ms**  
**Ângulo de rotação: 0°**  
**Avanço lateral: 0 μm**



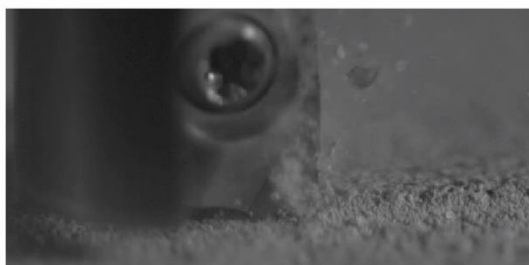
**Quadro: 02**  
**Tempo: 0,08 ms**  
**Ângulo de rotação: 7,5°**  
**Avanço lateral: 2,25 μm**



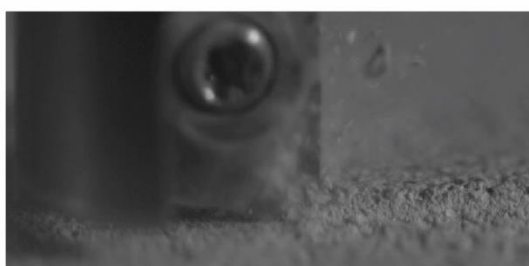
**Quadro: 03**  
**Tempo: 0,17 ms**  
**Ângulo de rotação: 15°**  
**Avanço lateral: 4,45 μm**



**Quadro: 04**  
**Tempo: 0,25 ms**  
**Ângulo de rotação: 22,5°**  
**Avanço lateral: 6,75 μm**



**Quadro: 05**  
**Tempo: 0,33 ms**  
**Ângulo de rotação: 30°**  
**Avanço lateral: 9,00 μm**



**Quadro: 06**  
**Tempo: 0,42 ms**  
**Ângulo de rotação: 37,5°**  
**Avanço lateral: 11,25 μm**

Foi avaliado, com esta câmera, a usinagem do arenito com as Pastilhas de Metal duro, Pastilhas de PCD e Broca Diamantada. Cabe salientar que a fresa porta pastilhas, quando montada, é de apenas um corte (um dente).

Considerando que as imagens foram capturadas com velocidade de 15.000 fotos por segundo e os parâmetros de usinagem foram velocidade de rotação da ferramenta de 15.000 rpm, profundidade de corte 1 mm, penetração de trabalho 50% do diâmetro e velocidade de avanço de 400 mm/min, significa que a cada rotação da ferramenta tem-se um avanço de 27  $\mu\text{m}$  e entre uma imagem e a outra, a ferramenta gira 6° e tem um avanço de 0,45  $\mu\text{m}$ .

As Pastilhas de Metal Duro e de PCD (geometria definida), com ângulo de corte (saída)  $\gamma$  positivo (7° e 20° respectivamente) mostraram formação da maior parte dos cavacos na frente da ferramenta (poucos atrás) confirmando os estudos de Wagner (1971) e Reichenbächer (2010). Já a Broca Diamantada (geometria não definida) apresentou formação de cavacos muito aleatória, tanto na frente como atrás da mesma. Segundo Tönshoff, Hillmann-Apmann e Asche (2002), este comportamento, formação de cavacos primários (na frente da ferramenta) e secundários (atrás da ferramenta) é característico do corte de ferramenta de geometria não definida.

Para as ferramentas de geometria definida foi observada a variação do tamanho dos cavacos gerados na mesma operação de usinagem. Observou-se uma geração de cavacos mais cíclica. A ferramenta, ao se deslocar usinando o arenito, encontra grãos de quartzo e os mesmos são em parte cortados e em parte arrancados, gerando cavacos de tamanho grande que são lançados em direções aleatórias. Após este corte, ou arranque de grãos, fica um espaço vazio na frente da ferramenta. Ao continuar o deslocamento, a ferramenta encontra este espaço vazio, retirando cavacos pequenos que não foram removidos (matriz e cimento), apenas nivelando a usinagem. A ferramenta segue em movimento até passar o vazio gerado e encontrar material novamente, iniciando novo ciclo de geração de cavacos: grandes e a seguir pequenos. Comportamento semelhante é descrito nos estudos teóricos de Wagner (1971) e Reichenbächer (2010).

Para a Broca Diamantada (geometria não definida) foi observado que a formação dos cavacos é mais constante, com formação de cavacos pequenos de forma contínua, lançados em todas as direções. Eventualmente ocorre geração de cavacos maiores. Este comportamento explica os resultados apresentados na

análise da granulometria dos cavacos (Tabela 22).

As ferramentas utilizadas apresentam corte frontal e no topo. É possível notar nas imagens que o fenômeno descrito anteriormente (arrancamento de material) tem grande ocorrência no corte frontal da ferramenta e muito pequena no corte do topo da ferramenta, provavelmente porque nesta região existe uma proteção lateral dos grãos do arenito em usinagem por outros grãos que ali estão formando a rocha, funcionando como um maciço rochoso e não como uma peça de arenito isolada.

A usinagem na borda do arenito facilita a formação de cavacos maiores devido ao cisalhamento lateral, pela falta de apoio. Nesta região é aconselhável que o deslocamento da ferramenta seja de fora para dentro da rocha para que o material usinado tenha mais apoio lateral, impedindo a ruptura indesejada que compromete a qualidade do produto usinado. Não foi possível notar diferenças significativas entre o corte concordante e discordante.

Além das imagens obtidas com velocidade de captura de 15.000 quadros por segundo foram obtidas as imagens da figura 77 com 12.000 quadros por segundo, utilizando Pastilha de PCD com velocidade avanço de 2.000 mm/min, velocidade de rotação de 15.000 rpm, profundidade de corte de 1 mm e penetração de trabalho de 50 % do diâmetro. Nestas condições a ferramenta tem um avanço de 133  $\mu\text{m}$  a cada rotação e entre cada foto a ferramenta gira 7,5°.

A análise deste vídeo mostra retirada mais contínua de material (arenito) pela ferramenta, não ocorrendo o arranque cíclico de cavaco grande seguido por usinagem em vazio com poucos cavacos pequenos e novamente arranque de cavaco grande. Devido ao avanço lateral da ferramenta ser grande, a cada rotação o deslocamento da ferramenta encobre o vazio gerado pelo corte anterior e ainda alcança novamente material da rocha para ser usinado. Isto traz como vantagem um maior rendimento na usinagem, porém, surge o problema de arranque de material demasiado onde não há proteção lateral, como nas bordas. Outro fator que deve ser levado em conta é a vida da ferramenta nestas condições de trabalho. Devido ao alto custo das ferramentas de PCD e ao número de ferramentas disponíveis para a pesquisa, não foi possível fazer esta análise.

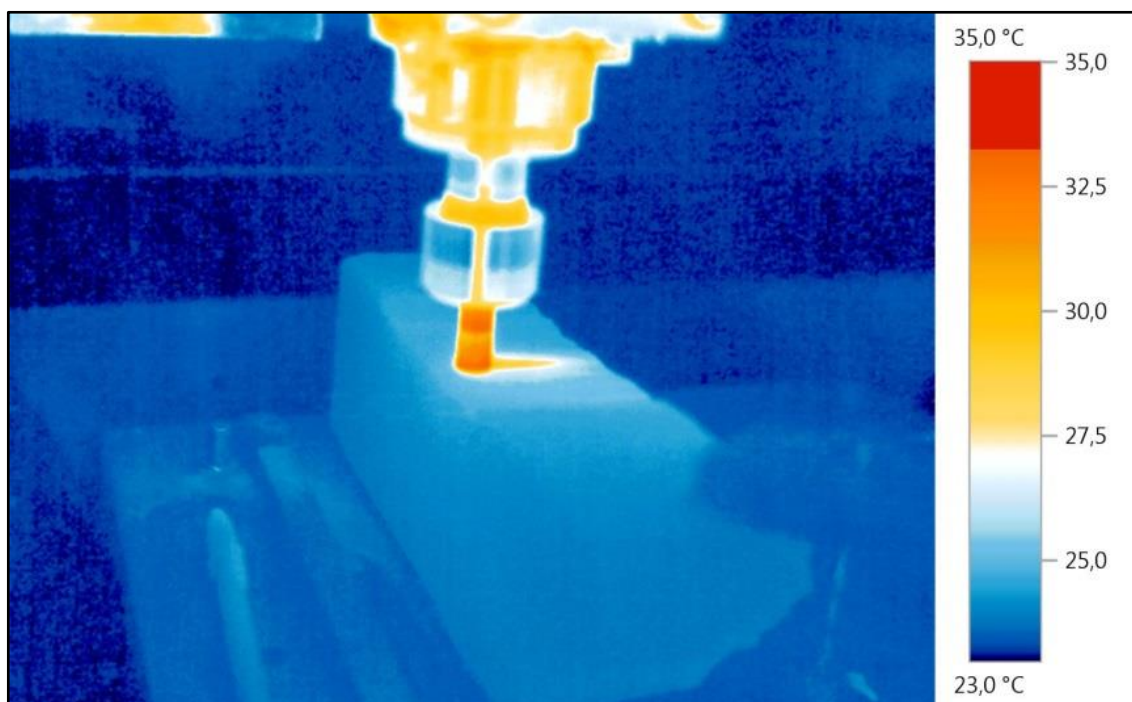
#### 4.5 AVALIAÇÃO DE TEMPERATURAS

Durante os ensaios as temperaturas medidas ficaram, na maior parte do tempo, entre 35°C e 120°C para todas as ferramentas. Observou-se que quando a ferramenta saía do material (a cada passe) havia um rápido resfriamento da mesma. Houve raros picos de temperatura onde o mais alto observado chegou próximo a 200°C. Isto se supõe que sejam pequenas inclusões de materiais mais duros presentes na rocha. Também houve o caso da Ferramenta Inteiriça de Metal Duro, que ultrapassou a temperatura de 350°C no momento em que o fio da ferramenta se desgastou completamente, não havendo mais condição de corte da mesma. Ainda houve o caso da ferramenta diamantada por eletrodeposição em que a temperatura chegou a 175°C quando a mesma perdeu toda a camada de diamante da ponta e permaneceu usinando apenas com a camada diamantada da lateral.

Embora os valores das medições possam sofrer variações devido ao tempo de resposta do termógrafo e ao movimento da ferramenta, pode-se notar que os valores de temperatura são baixos, se comparados com as temperaturas geradas na usinagem de metais. Outra evidência de que as temperaturas geradas na usinagem de arenito com ferramentas de diamante são baixas, é o fato de que, após a usinagem, pode-se pegar a ferramenta com a mão sem sentir desconforto em relação à temperatura.

Conforme abordado no tópico 3.3.4, é importante conhecer as temperaturas envolvidas no processo de usinagem do arenito. Primeiramente, têm-se o efeito da temperatura sobre o fio das ferramentas. Porém também, têm-se o caso das ferramentas de diamante, que são compostas de duas partes, soldadas por brasagem, que não podem ser usadas caso as temperaturas se aproximem do ponto de fusão da liga usada na união, pois as partes irão se separar e a ferramenta perde a sua função.

Após avaliação dos vários ensaios de medição de temperatura, chegou-se à conclusão que é possível usinar o arenito sem a utilização de líquido refrigerante. O fato de não haver necessidade de usar fluido para refrigeração da ferramenta também foi importante para a aquisição das imagens pela câmera de alta velocidade. A figura 78 mostra, como exemplo, o resultado de um ensaio com o uso do Termógrafo.

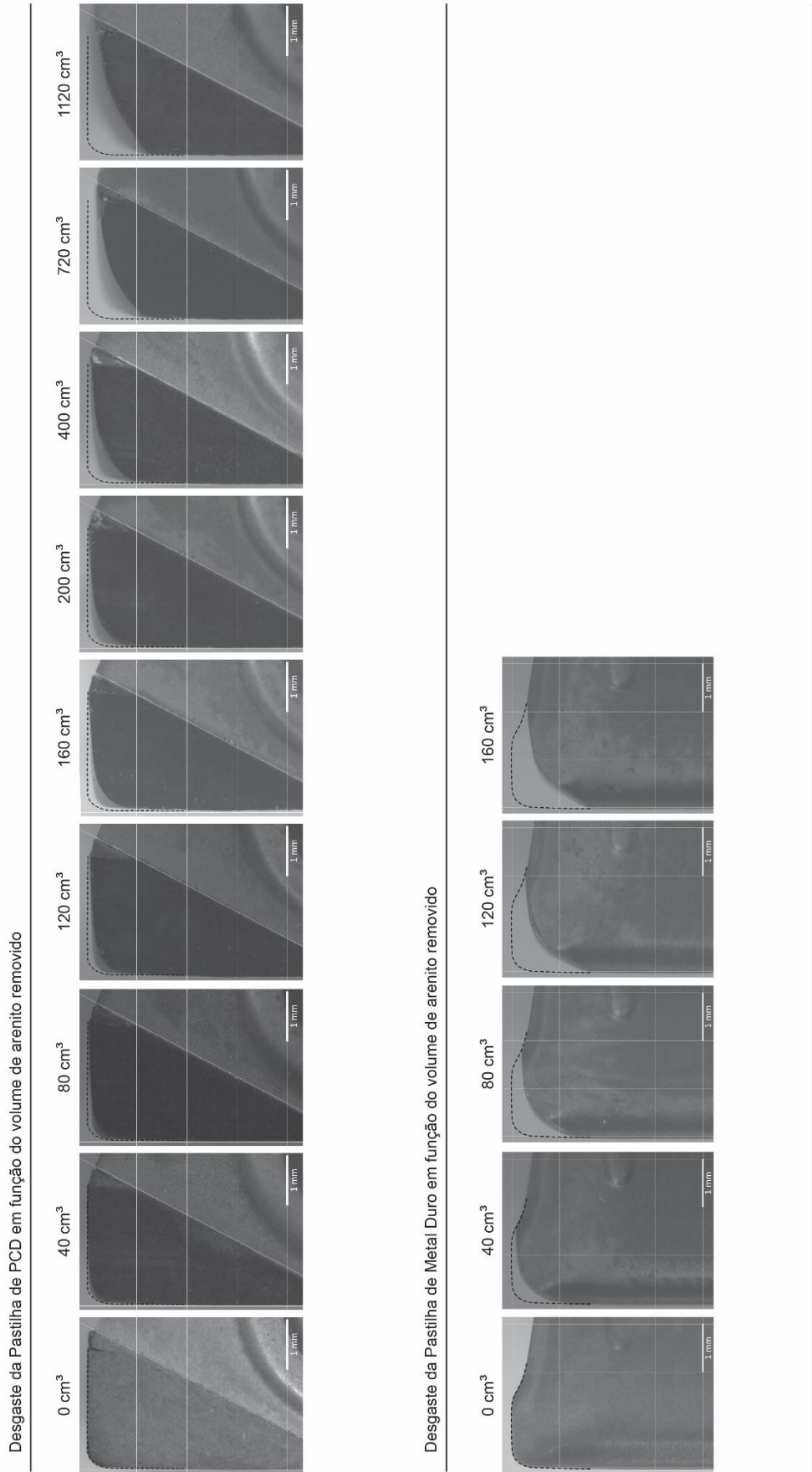
**Figura 78 - Termografia durante o ensaio de usinagem de arenito**

#### 4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS

De modo a facilitar a interpretação dos resultados dos ensaios de vida das pastilhas de metal duro e de PCD, as imagens dos desgastes foram apresentadas de forma progressiva. Também foram posicionadas, uma ao lado da outra, permitindo assim, fazer uma comparação dos desgastes das duas ferramentas para o mesmo volume de material removido.

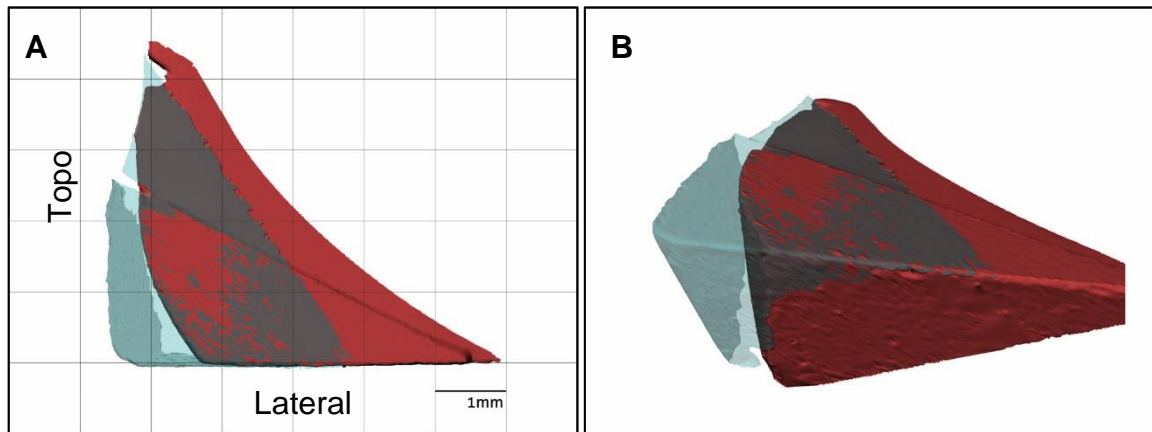
Os resultados são apresentados na figura 79, que mostra uma sequência de nove imagens da pastilha de PCD e cinco imagens da pastilha de metal duro. Após remover 160 cm<sup>3</sup> de arenito (80 minutos de trabalho efetivo), a pastilha de metal duro chegou ao fim de sua vida útil. Já a pastilha de PCD conseguiu remover 1.120 cm<sup>3</sup> (560 minutos de trabalho efetivo) até chegar ao fim de sua vida útil. Acima de cada imagem mostra-se a quantidade de material removido em cm<sup>3</sup>, sendo que o valor zero significa a ferramenta nova, sem uso.

Figura 79 - Desgaste progressivo das Pastilhas de PCD e de Metal Duro no Ensaio de Vida



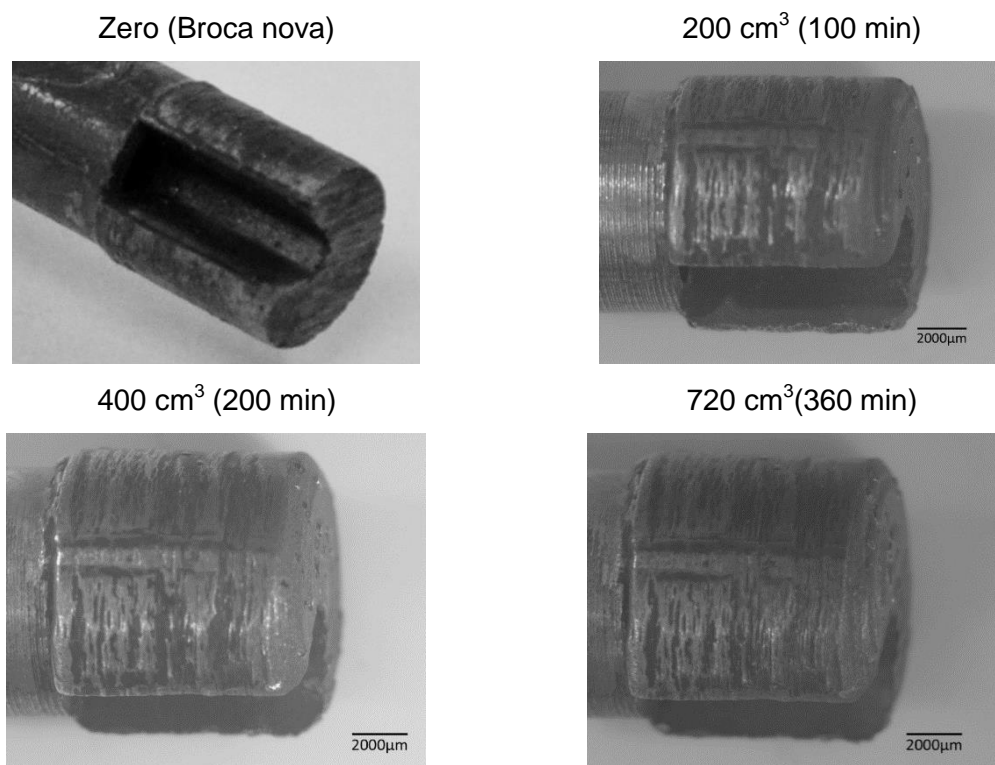
A figura 80 mostra uma imagem do desgaste da pastilha de PCD após remover 1.120 cm<sup>3</sup> de material, obtida por digitalização tridimensional a laser. Devido ao desgaste acentuado, não foi realizada análise no software Geomagic Qualify, porém, os modelos foram renderizados no software Rhinoceros para melhor visualização.

**Figura 80 – Pastilha de PCD após remover 1120 cm<sup>3</sup> de arenito (9 horas e 20 minutos de trabalho), obtida por digitalização 3D. (A) Vista superior; (B) Vista em perspectiva isométrica**



A figura 81 mostra imagens da Broca Diamantada sem uso e após remover 200, 400 e 720 cm<sup>3</sup>.

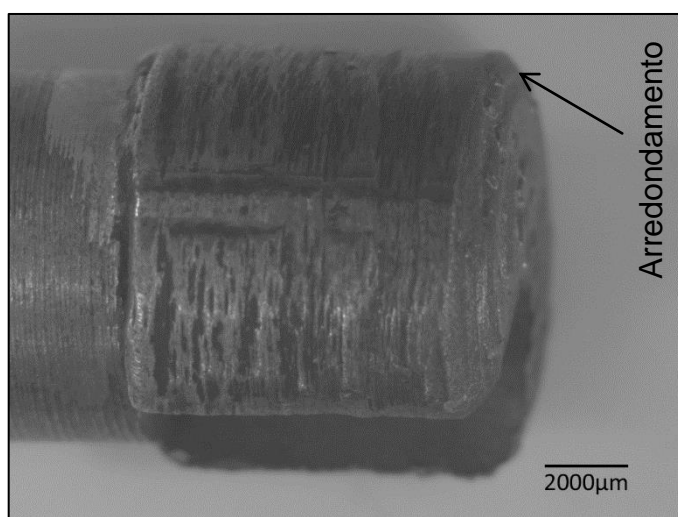
**Figura 81 – Broca Diamantada nova e após remover 200, 400 e 720 cm<sup>3</sup>**





A Broca Diamantada foi afiada após remover 720 cm<sup>3</sup> (6 horas de trabalho efetivo) e foi possível remover mais 720 cm<sup>3</sup> após a afiação. Estima-se que, em função do comprimento, esta ferramenta pode ser afiada pelo menos 10 vezes, então até o final da vida seria possível remover 7.200 cm<sup>3</sup> de material, duração de aproximadamente 3600 minutos de trabalho efetivo. O desgaste desta ferramenta ocorre no canto, ou seja, na linha de interseção da lateral do cilindro com sua base (figura 82). Durante a usinagem o canto vai se desgastando ficando arredondado e a ponta da ferramenta, inicialmente plana, vai se tornando esférica. A necessidade de afiação ocorre quando na operação de faceamento, com avanço lateral de 50% do diâmetro, a superfície usinada começa a apresentar ondulações, ou seja, não fica mais plana (figura 83).

**Figura 82 – Broca Diamantada após fim da primeira vida (hora de sofrer afiação)**



**Figura 83 - Superfície do arenito após faceamento com broca diamantada, no final da vida útil, mostrando ondulações**



Afiar a ferramenta significa retirar a parte esférica do topo da ferramenta, deixando-o plano novamente. A afiação está concluída quando o topo fica plano novamente e a intersecção do topo com a parte lateral forma um canto vivo (figura 84).

**Figura 84 – Broca Diamantada após afiação**



É importante salientar que embora esta ferramenta apresente baixo custo, ela apresenta grande variação dimensional de circularidade e cilindridade. Uma ferramenta com diâmetro nominal de 10 mm apresenta dimensões que variam de 10,1 a 10,6 mm. Outro problema é a grande perda de material durante a usinagem, o que demandaria fazer inúmeras afiações e correções da altura da ferramenta durante o processo de usinagem, pois é uma ferramenta que efetua o corte pelo princípio da abrasão. Devido a estes problemas, estas ferramentas são mais indicadas para desbaste ou operações nas quais estas variações dimensionais possam ser toleradas. Por essa razão, elas também não foram utilizadas na usinagem das inscrições da Pedra Grande.

#### 4.7 USINAGEM DOS MOSAICOS RÉPLICAS DA PEDRA GRANDE EM ARENITO

Um resumo das operações, tempo gasto e volume de material (arenito) removido na usinagem dos mosaicos 1, 2, 3 e 4 podem ser vistos no quadro 8.

**Quadro 08 - Operações, tempo gasto e volume removido**

	Mosaico	Faceamento	Desbaste	Acabamento 1	Acabamento 2	Somatório
<b>Volume Removido (cm<sup>3</sup>)</b>	1	40	459,8	77,9	1,3	579,0
	2	40	492,0	81,9	1,7	615,6
	3	40	336,2	64,8	1,3	442,3
	4	40	644,7	63,4	2,6	750,7
<b>Tempo Gasto (min)</b>	1	21	100,5	67,2	108,3	297,0
	2	21	111,0	56,3	94,0	282,3
	3	21	78,5	67,0	112,8	279,2
	4	21	313,0	65,0	111,0	510,0

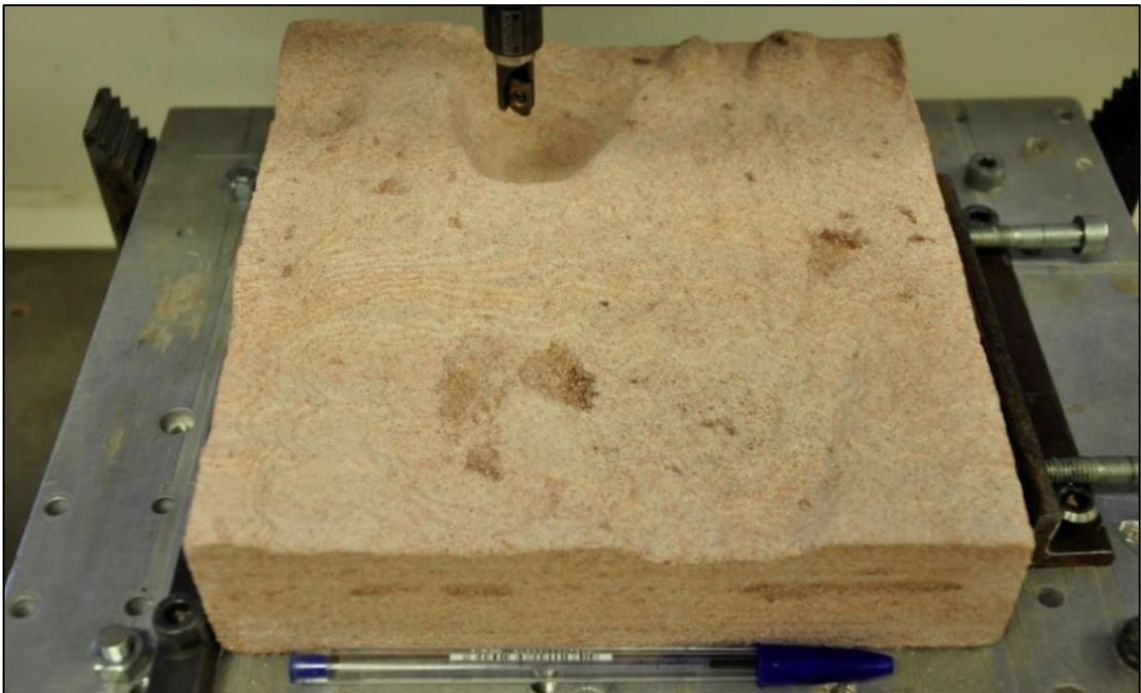
As imagens das figuras 85 a 88 mostram o resultado da sequência de operações de usinagem do mosaico 4, partindo do bloco serrado nas dimensões de 200 x 200 x 70 mm e passando por operações de faceamento, desbaste e acabamentos. Na figura 85 pode ser visto o resultado da primeira operação de usinagem que foi o faceamento. Esta operação teve o objetivo de nivelar a superfície superior para que pudesse ter um controle da profundidade de corte na operação seguinte (desbaste), ou seja que em qualquer região da peça a medida de profundidade tenha a mesma referência.

Na figura 86 mostra-se o resultado da operação de desbaste, a qual foi feita em camadas de 1 mm, aparecendo os vários planos de cada nível separados por um degrau reto devido a usinagem com fresa de topo de ponta reta. Na figura 87 mostra-se o resultado da primeira operação de acabamento com fresa de topo de ponta esférica de 10 mm de diâmetro. Nesta figura já é possível notar uma retirada de material de modo a se aproximar da forma final do objeto, eliminando os cantos vivos e usinando as superfícies curvas sobre as superfícies planas. Já na figura 88 mostra-se a operação final de acabamento com fresa de topo de ponta esférica de 6 mm de diâmetro. Nesta operação de usinagem o mosaico 4 já adquiriu a sua forma final.

**Figura 85 - Bloco de arenito quadrado de 200 x 200 mm após faceamento**



**Figura 86 - Mosaico 4 após operação de desbaste**



**Figura 87 - Mosaico 4 após 1ª operação de acabamento**



**Figura 88 - Mosaico 4 após operação final de acabamento**

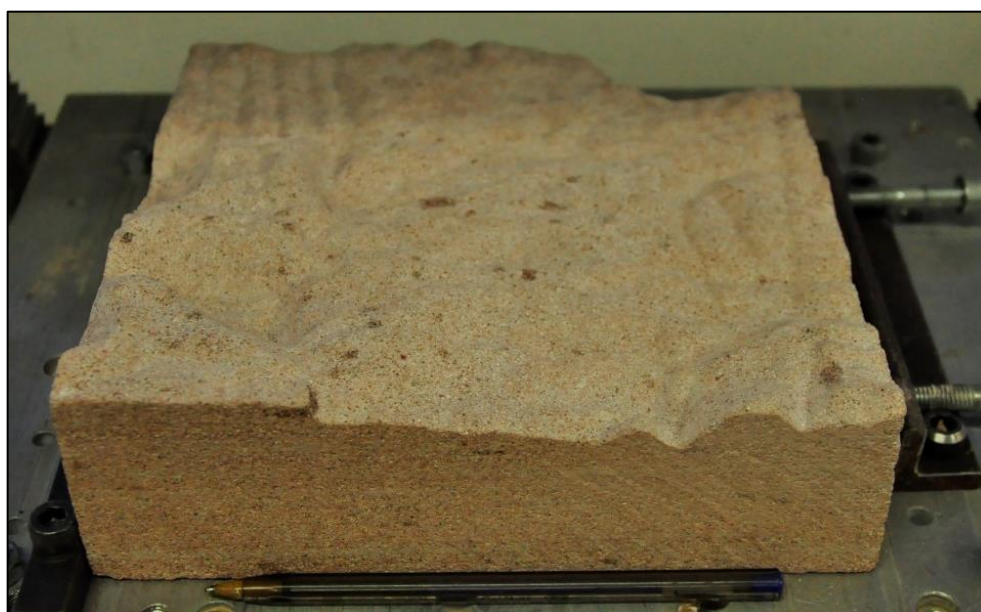


Nas figuras 89, 90 e 91 podem ser vistos, respectivamente, os resultados da operação final de acabamento dos mosaicos 3, 2 e 1. Cabe destacar que estes mosaicos passaram pelos mesmos processos descritos para o mosaico 4.

**Figura 89 - Imagem do mosaico 3 após operação final de acabamento**



**Figura 90 - Imagem do mosaico 2 após operação final de acabamento**



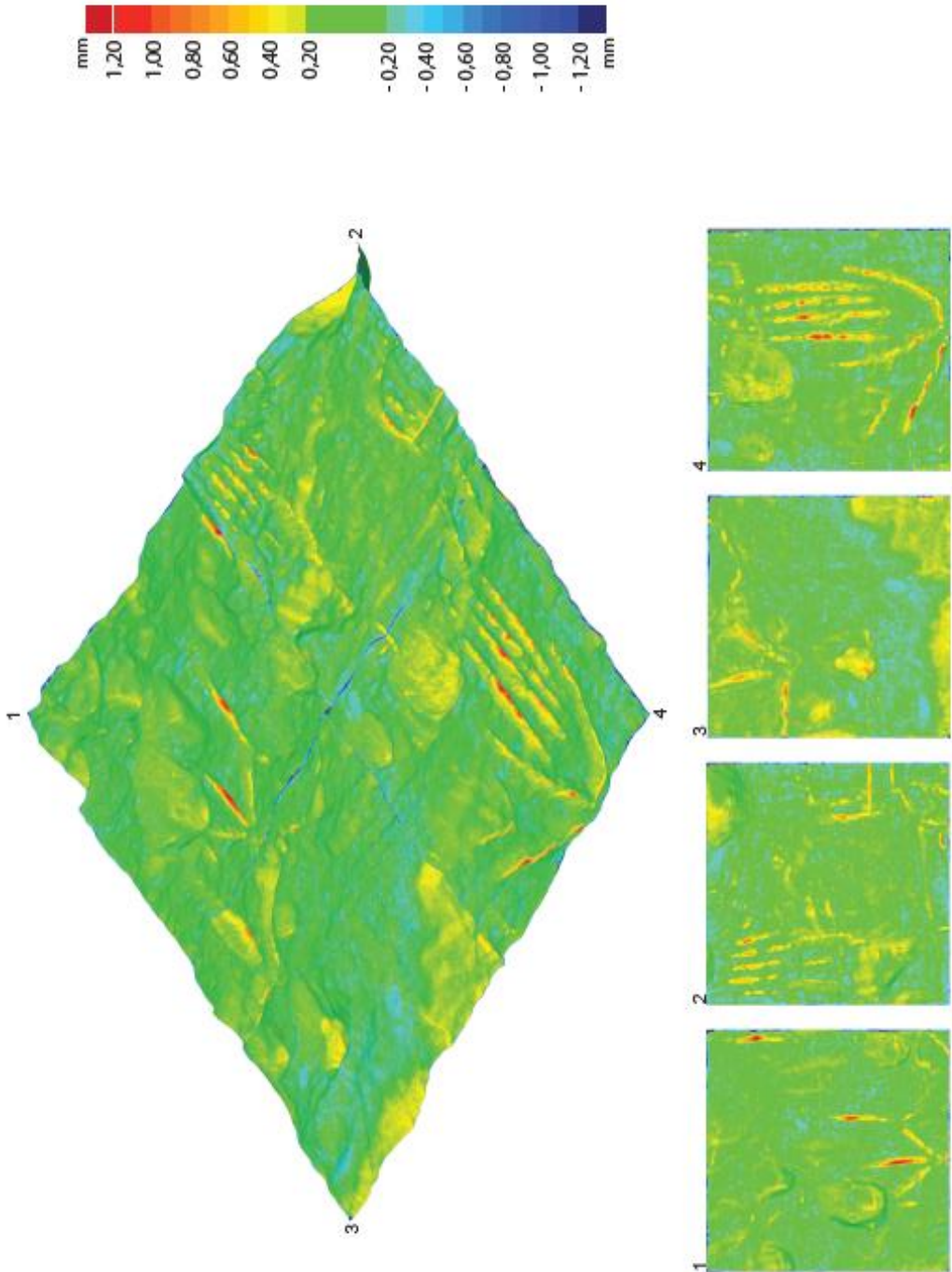
**Figura 91 - Imagem do mosaico 1 após operação final de acabamento**



Os resultados da comparação das digitalizações da réplica usinada em arenito com a da pedra grande *in loco* são mostrados na figura 92. Analisando a figura 92 é possível notar que os mosaicos apresentaram desvios para mais e para menos. Desvios positivos significam regiões em que deveria ser retirado material e não foi e desvios negativos significam material que não deveria ser retirado, mas foi.

Os desvios positivos máximos (1,2 mm), em pequena quantidade (amarelo e vermelho), ocorreram, em geral, no fundo dos sulcos. Isto significa que a ferramenta não alcançou esta profundidade. A ferramenta de menor raio utilizada foi de 3 mm, o que significa que raios de dimensões inferiores a 3 mm não puderam ser usinados. Esta limitação ocorreu por falta de ferramenta de diamante de ponta esférica com raio menor que 3 mm, que no momento da usinagem não foi encontrada no mercado. Os desvios negativos (cor azul), também em pequena quantidade, com valor máximo de 1,2 mm, ocorreram principalmente nas bordas dos mosaicos. Durante a usinagem destas regiões o material em usinagem fica sem apoio lateral, e, dependendo do grau de coesão da rocha, ele pode ser arrancado pela força gerada pelo deslocamento lateral da ferramenta. Também ao longo da superfície usinada apareceram alguns pontos azulados mostrando desvios negativos. Isto pode ser atribuído, em parte, à porosidade do material.

Figura 92 - Comparação dos mosaicos usinados com a versão original digitalizada





A maior parte dos desvios, tanto positivos como negativos, ficou na faixa de 0,1 a 0,5 mm, cor amarelo e azul claro, valores que ficam dentro da faixa do tamanho dos grãos que compõem este arenito.

#### 4.8 ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS NA USINAGEM DA RÉPLICA DA PEDRA GRANDE.

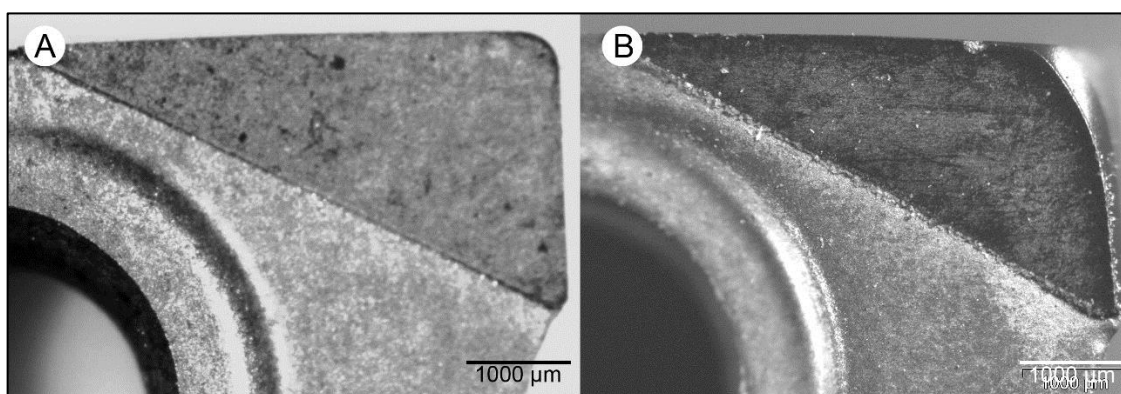
O quadro 09 mostra o volume de material removido com cada ferramenta bem como também, os mosaicos usinados, as operações de usinagem efetuadas e o tempo de usinagem.

**Quadro 09 - Volume de material removido por cada ferramenta, operações efetuadas, e mosaicos usinados**

Ferramenta	Operação e Mosaicos Usinados	Volume de Material Removido (cm <sup>3</sup> )	Tempo de Usinagem (min)
Pastilha de PCD nº1	Faceamento e Desbaste Mosaico 4	684,7	353,0
Pastilha de PCD nº2	Faceamento e Desbaste Mosaicos 1, 2 e 3	1408,0	334,0
Fresa Wirutex de diamante PCD esférica 10 mm	1º Acabamento Mosaicos 1, 2, 3 e 4	288,0	255,5
Fresa Wirutex de diamante PCD esférica 6 mm	2º Acabamento Mosaicos 1, 2, 3 e 4	6,9	426,1

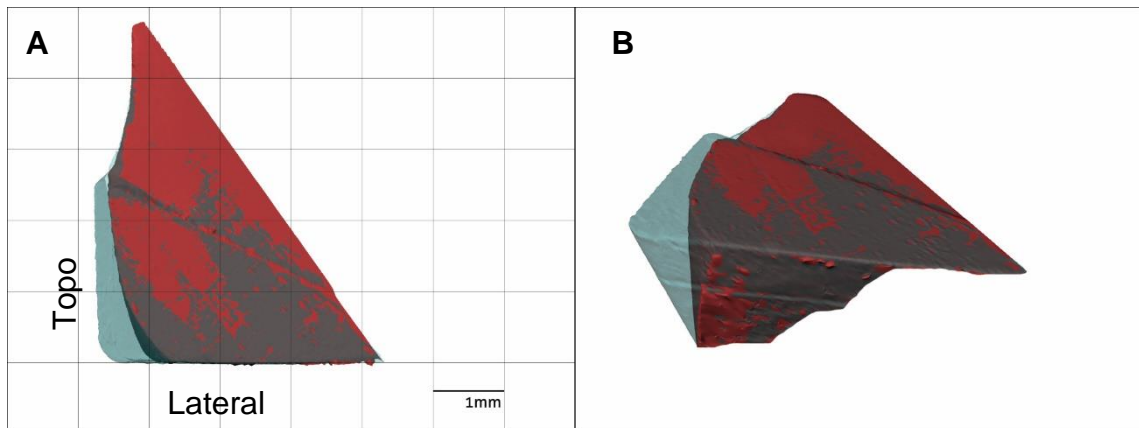
Foram avaliados os desgastes das ferramentas de usinagem em cada operação. As ferramentas foram fotografadas em lupa estereoscópica e digitalizadas antes e depois da usinagem. As imagens dos desgastes das pastilhas de PCD, utilizadas nas operações de faceamento e desbaste dos mosaicos são apresentadas nas figuras 93 a 96.

**Figura 93 – Pastilha de PCD Nº 1**



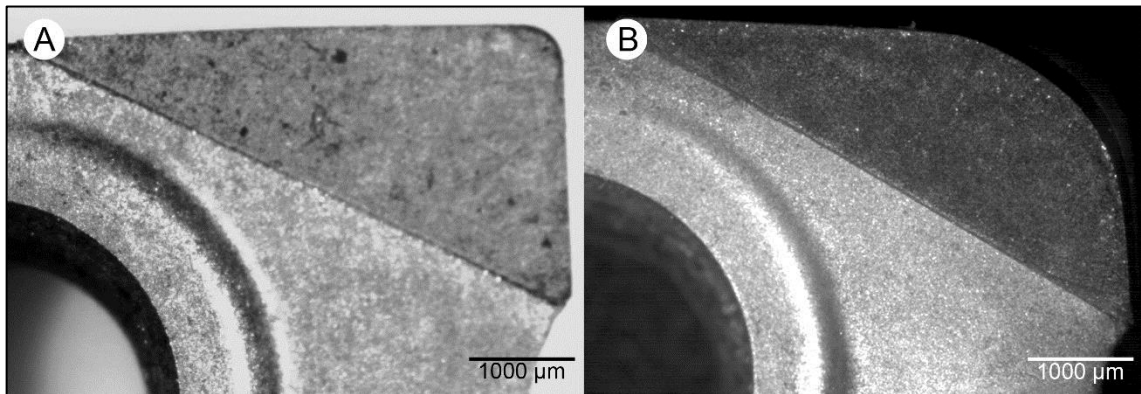
(A) Nova e (B) após usinagem do Mosaico 4

**Figura 94 – Desgaste da Pastilha de PCD nº 1 após operações de faceamento e desbaste do mosaico 4 que removeu 684,7 cm<sup>3</sup> de arenito**



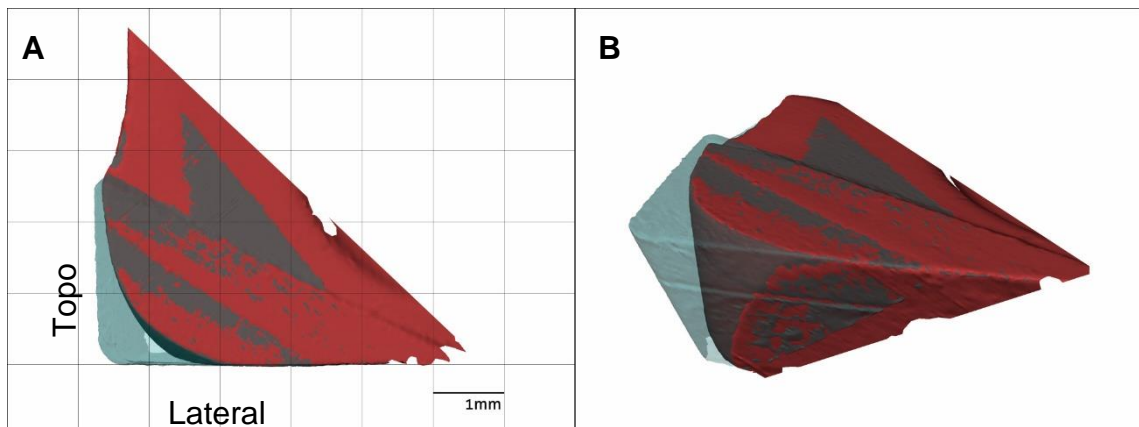
(A) Vista superior; (B) Vista em perspectiva isométrica

**Figura 95 – Pastilha de PCD Nº 2**



(A) Nova e (B) após usinagem dos Mosaicos 1, 2 e 3

**Figura 96 - Desgaste da Pastilha de PCD nº 2 após operações de faceamento e desbaste dos mosaicos 1, 2 e 3 que removeu 1408 cm<sup>3</sup> de arenito.**



(A) Vista superior; (B) Vista em perspectiva isométrica.

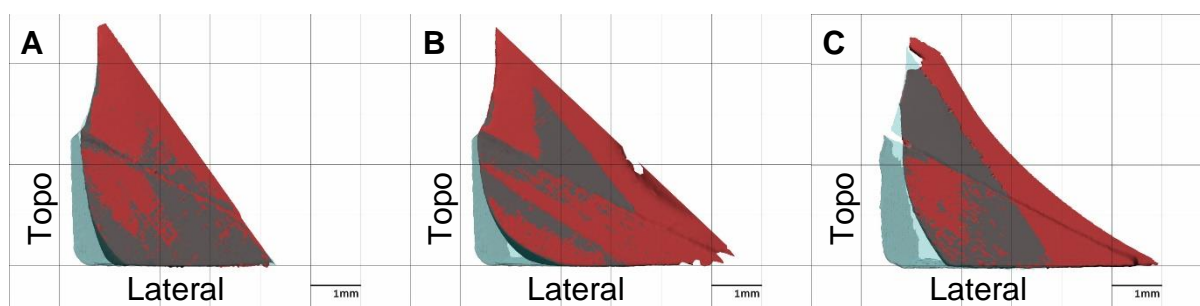
Para uma análise de desgaste mais completa foram comparadas três pastilhas de PCD: Pastilha de PCD nº 1, usada na usinagem do mosaico 4; pastilha de PCD nº 2, usada na usinagem dos mosaicos 1, 2 e 3 e pastilha de PCD, agora denominada nº 3, que é a que foi usada no ensaio de vida de pastilha de PCD (tópicos 3.3.5 e 4.6). O quadro 10 mostra o volume removido por cada ferramenta, o tempo de usinagem, a taxa de remoção em  $\text{cm}^3/\text{min}$  e os parâmetros de usinagem. A figura 97 mostra as imagens de desgaste das três ferramentas lado a lado para uma melhor interpretação.

**Quadro 10 – Desempenho das pastilhas de PCD e parâmetros de usinagem**

Pastilha de PCD	Nº 1	Nº 2	Nº3
Volume removido ( $\text{cm}^3$ )	684,7	1408,0	1120,0
Tempo de usinagem (min)	353	334	560
Taxa de remoção ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	1,94	4,22	2,00
Vel. de avanço (mm/min)	400	400	400
Prof. De corte (mm)	1	2	1
Penetração de trabalho (mm)	CAM*	CAM*	6
Velocidade de rotação (rpm)	15.000	15.000	15.000

CAM\* significa que a penetração de trabalho para estes casos foi determinada automaticamente pelo software Edgecam em função da estratégia de usinagem, da geometria da ferramenta, da profundidade de corte e das tolerâncias especificadas.

**Figura 97 – Imagem do desgaste das pastilhas de PCD nº 1, 2 e 3.**



(A) Pastilha nº 1, (B) Pastilha nº 2 e (C) Pastilha nº 3

Analisando os dados do quadro 10 e a figura 97 é possível notar primeiramente que a forma do desgaste e as condições de usinagem para cada ferramenta são diferentes, mas que existe uma relação entre elas.

As pastilhas 1 e 3 tiveram uma forma de desgaste mais paralela ao topo da

ferramenta (forma de retângulo) enquanto que a 2 teve um desgaste maior na parte lateral da ferramenta (forma de triângulo). A razão desta forma de desgaste está relacionada com a profundidade de corte e também com as condições de usinagem. As ferramentas 1 e 3 trabalharam com prof. de corte de 1 mm, enquanto a ferramenta 2 trabalhou com profundidade de corte de 2 mm. A ferramenta 3 trabalhou todo o tempo em operação de faceamento, utilizando 1 mm da aresta lateral e toda a aresta do topo, o que tende a produzir um desgaste mais uniforme. Mesmo assim, o desgaste foi maior mais próximo da aresta lateral. Isso se deve a que quanto mais próximo da aresta lateral maiores são as velocidades de corte e maior é a quantidade de material retirado, gerando maior atrito e, conseqüentemente, maior abrasão e maior desgaste. O comportamento da ferramenta 1 foi semelhante ao da 3, mas a primeira se desgastou menos, pois removeu menor quantidade de material e teve menor tempo em operação de usinagem.

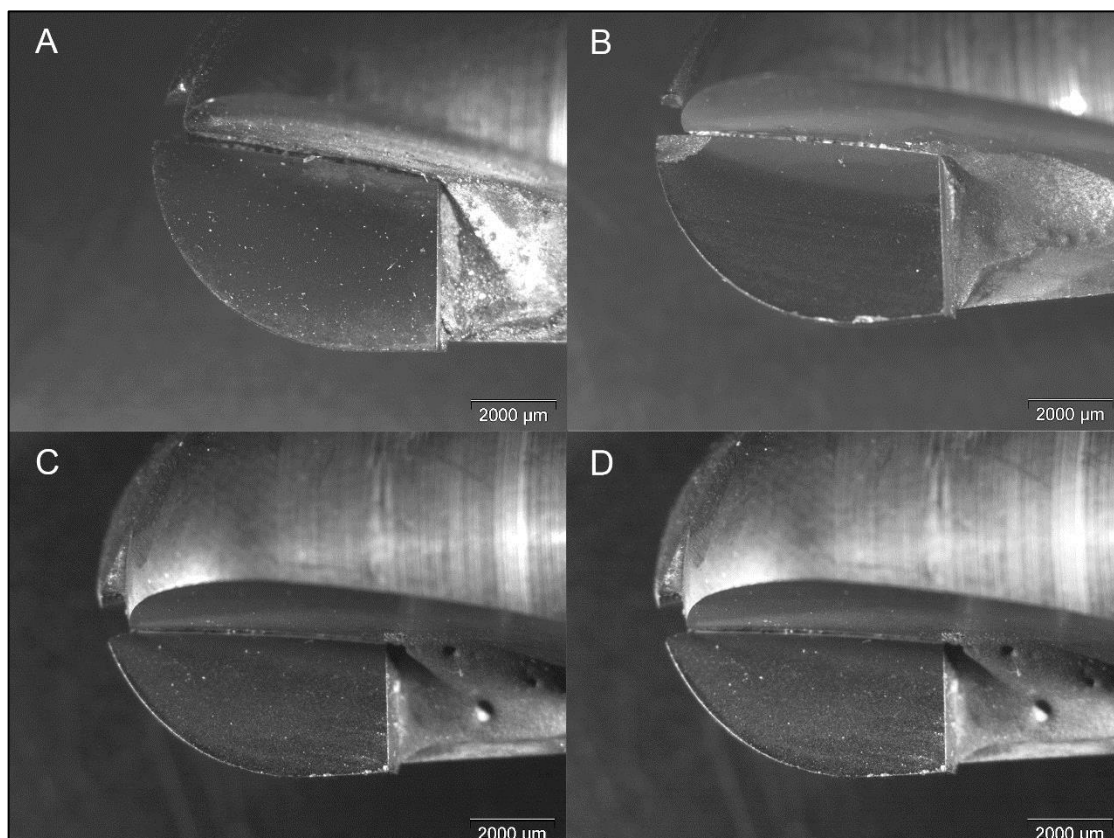
A pastilha 2 apresentou forma de desgaste diferente das outras e foi a ferramenta que removeu o maior volume de material num intervalo de tempo menor. Essa pastilha apresentou um desgaste intermediário, maior que a 1 e menor que a 3. A taxa de remoção foi o dobro das outras, mas a condição de trabalho foi semelhante à 1 e diferente da 3. Esta ferramenta teve uma exigência maior na aresta lateral.

Em operação de faceamento com profundidade de corte 1 mm a pastilha 3 chegou ao fim da vida após remover  $1120 \text{ cm}^3$  de arenito num intervalo de tempo de 9 horas e 20 minutos. Já a pastilha 2, na maior parte em operação de desbaste (apenas 20 minutos em operação de faceamento) com profundidade de corte de 2 mm, removeu  $1408 \text{ cm}^3$  num intervalo de tempo de 5 horas e 34 minutos e apresentou desgaste menor que a 3. Isto leva a crer que o desgaste deste tipo de ferramenta, usinando arenito, é proporcional ao tempo em operação de usinagem, pois o desgaste tem grande influência do contato com o material abrasivo. Os experimentos inferem que para este caso, uma taxa de remoção maior (profundidade de corte maior) permite que a ferramenta remova maior quantidade de material até chegar ao fim de sua vida útil. Por outro lado, o desgaste em forma de raio no canto da ferramenta também é problemático, pois em operações de faceamento com avanço lateral de 50% do diâmetro da ferramenta, a superfície usinada começa a apresentar sulcos como os mostrados na figura 83 (página 145).

Para as ferramentas de PCD de ponta esférica não foi possível fazer essas

mesmas comparações, pois as condições de operação de cada uma são muito particulares e, além disso, foi usada apenas uma ferramenta de cada tipo. A figura 98 mostra a fresa de ponta esférica de 10 mm de diâmetro antes e após o desgaste.

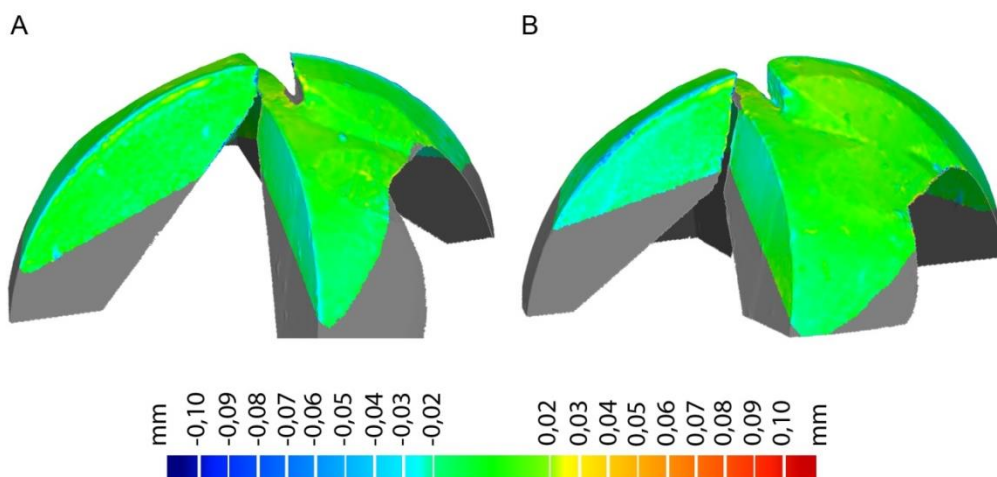
**Figura 98 - Desgaste da ferramenta de diamante PCD de ponta esférica com 10 mm de diâmetro após 1ª operação de acabamento dos mosaicos 1, 2, 3 e 4 que removeu 288 cm<sup>3</sup> de arenito.**



(A) PCD com corte maior, nova, (B) PCD com corte maior após uso, (C) PCD com corte menor, nova e (D) PCD com corte menor após uso

O desgaste destas ferramentas pode ser avaliado pelas imagens tridimensionais com espectro de cores obtidas por digitalização tridimensional e tratamento com o software Geomagic Qualify. A análise 3D permitiu estabelecer valores de desgaste de forma visual, baseado nas cores e escala das imagens tridimensionais obtidas das ferramentas (figura 99), pois nas imagens feitas na Lupa estereoscópica não foi possível notar desgaste.

**Figura 99 - Desgaste da ferramenta de PCD esférica de 10 mm de diâmetro.**

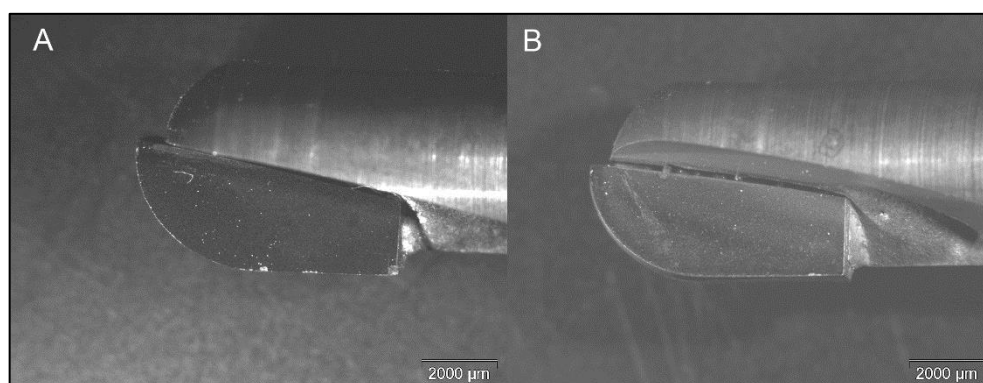


(A) corte maior e (B) corte menor

A ferramenta de 10 mm de diâmetro, de ponta esférica, apresenta dois cortes (dois dentes), sendo um maior e o outro menor, o que permite uma vida mais longa que uma ferramenta de apenas um corte. Em ambos os dentes, o desgaste foi semelhante. Como o nível de desgaste foi muito pequeno ficou difícil de mensurar, mesmo com o recurso da digitalização tridimensional a laser, que permite medições na ordem de centésimos de milímetro. A avaliação do desgaste feita por meio do espectro de cores permite dizer que foi menor que 0,1 mm, e ocorreu ao longo do fio da ferramenta. A ferramenta trabalhou 4 horas e 16 minutos e removeu 288 cm<sup>3</sup> de arenito em operação de acabamento. Assim, removeu o arenito com uma taxa de 1,13 cm<sup>3</sup>/min, sendo 0,565 cm<sup>3</sup>/min para cada dente.

A figura 100 mostra imagem de lupa estereoscópica da fresa esférica de PCD de 6 mm, nova e após a operação de acabamento final dos quatro mosaicos.

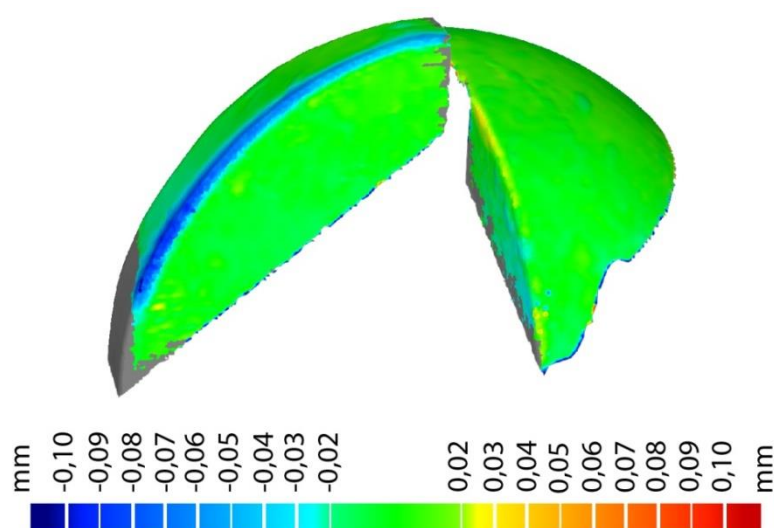
**Figura 100 - Desgaste da ferramenta de PCD de ponta esférica com 6 mm de diâmetro.**



(A) ferramenta nova e (B) após operação de acabamento

A figura 101 mostra a imagem da mesma ferramenta após a operação de acabamento final, obtida por digitalização tridimensional a laser e processada pelos softwares Geomagic Studio e Geomagic Qualify, na qual pode ser analisado o desgaste por meio de um espectro de cores que indica a ordem de grandeza dos desgastes.

**Figura 101 - Desgaste da ferramenta de diamante PCD de ponta esférica com 6 mm de diâmetro após operação final de acabamento dos mosaicos 1, 2, 3 e 4**

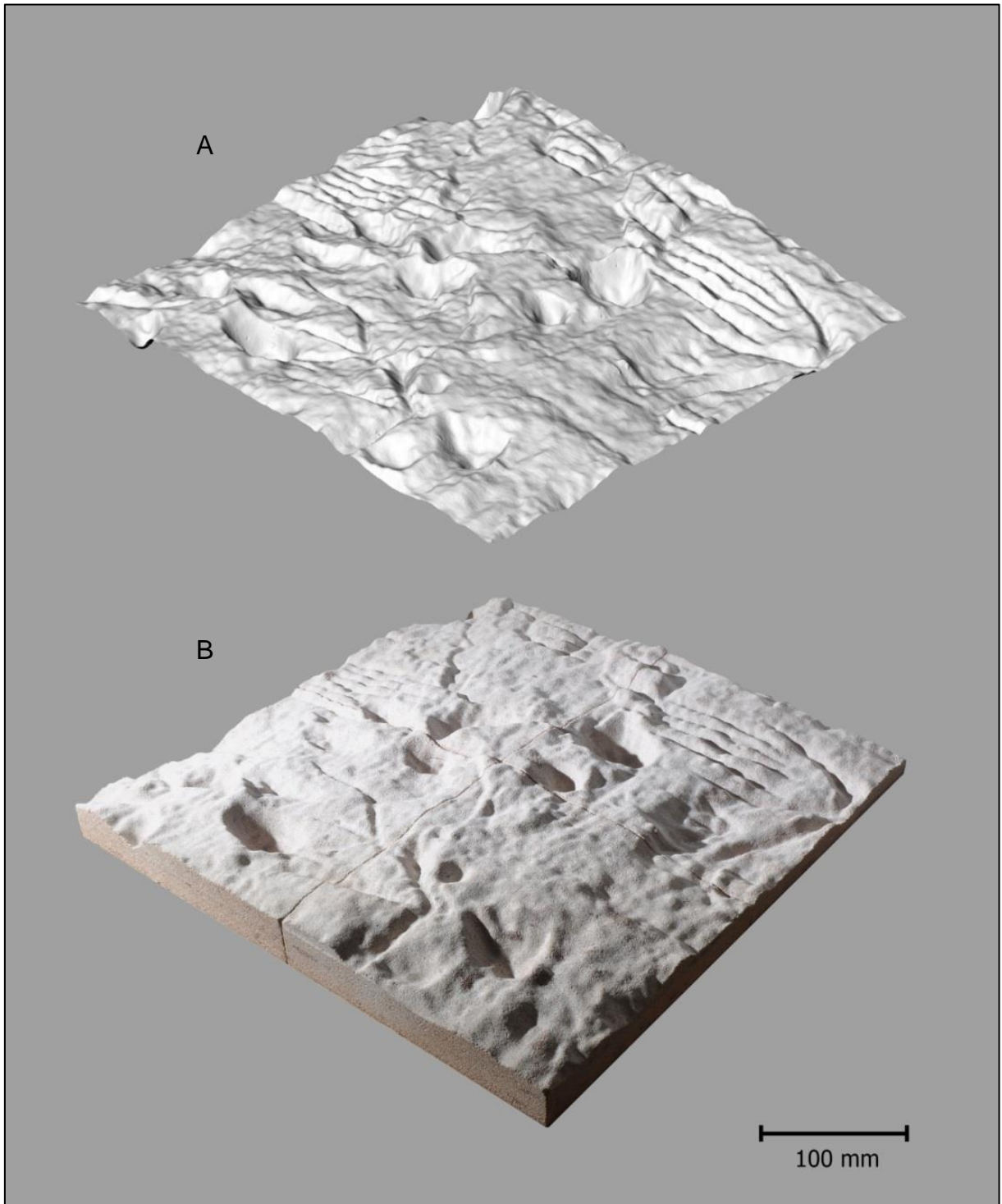


A ferramenta de 6 mm de diâmetro, de ponta esférica, tem apenas um corte (um dente). Esta ferramenta trabalhou 7 horas e 6 minutos e removeu somente 6,9 cm<sup>3</sup> de arenito em operação de acabamento final, com uma taxa de 0,016 cm<sup>3</sup>/min. Embora tenha removido pequeno volume de arenito esta ferramenta ficou um tempo grande em operação de usinagem, gerando desgaste por abrasão.

Na avaliação pelas imagens da lupa estereoscópica não foi possível notar que ocorreu algum desgaste. Já por meio do espectro de cores das imagens obtidas por digitalização tridimensional foi possível notar um pequeno desgaste sobre o fio da ferramenta, e foi possível estimar que foi da ordem de 0,1 mm.

Como forma de representar o resultado final desse trabalho, a figura 102 resume de forma visual o resultado da usinagem. Nela observa-se na parte superior a imagem da digitalização tridimensional e na parte inferior a réplica usinada em arenito composta de quatro mosaicos de 200 x 200 mm cada.

Figura 102 – Resultado final da usinagem dos mosaicos.



Malha de triângulos originada da digitalização do objeto real (A) e réplica usinada em arenito (B)



## 5 CONCLUSÕES

O processo proposto para produção de réplicas, com a utilização das tecnologias 3D (Digitalização Tridimensional e Usinagem CNC) e com as ferramentas determinadas, permitiu obter réplicas fidedignas de objetos em arenito sem nenhum contato físico com a obra original.

Para chegar a este resultado várias etapas foram seguidas. Inicialmente foram feitos alguns ensaios preliminares para avaliar a viabilidade do método. Posteriormente foi coletado material de fonte conhecida, caracterizado por petrografia e ensaios físicos e mecânicos. Após coleta e caracterização do material selecionou-se ferramentas e parâmetros de usinagem adequados ao tipo de material a ser usinado e à forma geométrica da superfície a ser obtida. Foram feitos ensaios de usinagem em fresadora CNC, durante os quais foram avaliadas temperaturas, processo de corte e formação de cavacos utilizando-se para tal termógrafo e câmera de alta velocidade. Ao final do estudo foram usinadas parte das inscrições rupestres da Pedra Grande e posteriormente comparadas com a obra original por digitalização tridimensional e análise pelos softwares Geomagic Studio e Qualify. As principais conclusões deste estudo são descritas a seguir.

O arenito Botucatu apresenta variações de composição e propriedades em função da localização da jazida. Por ser um material natural, não é homogêneo e pode apresentar variações de propriedades ao longo da mesma amostra. A petrografia e os ensaios físicos e mecânicos realizados permitiram conhecer as principais propriedades do arenito estudado, bem como a influência no processo de usinagem do mesmo. Os resultados mostraram um arenito com índice de abrasividade média e teor de  $\text{SiO}_2$  em torno de 70%. Essas informações foram de grande importância para a seleção do material da ferramenta e parâmetros de usinagem.

Entre as várias ferramentas ensaiadas foi possível concluir que para usinar uma rocha com o índice de abrasividade do arenito estudado ou superior, o material indicado para ferramenta de usinagem é o diamante. Dentre os tipos de ferramentas de diamante estudadas, a mais indicada para usinagem de arenito por fresamento CNC, com o objetivo de reproduzir formas geométricas complexas, com alta fidelidade, a partir de objetos digitalizados, é a de PCD, por apresentar o menor nível de desgaste e poder dispor da geometria desejada. Uma ferramenta com alto índice

de desgaste se torna inviável para esta finalidade devido à dificuldade de se fazer correções contínuas na programação da usinagem, para correção do referido desgaste.

Com relação ao acabamento superficial concluiu-se que também a ferramenta de PCD foi a que apresentou a menor rugosidade superficial dentre as ferramentas ensaiadas, além de conseguir manter as condições de corte por mais tempo. A rugosidade gerada pelo topo desta ferramenta ficou em torno de 22  $\mu\text{m}$  e a gerada pela lateral da mesma ficou em torno de 41  $\mu\text{m}$ , medidos em Ra com cutoff de 2,5 mm. Ainda cabe salientar que a ferramenta de PCD foi a que produziu a menor rugosidade superficial e a maior granulometria de cavacos gerados, fator característico do corte por ferramentas de geometria definida.

A análise do corte e geração de cavacos com a utilização da câmera de alta velocidade permitiu confirmar os estudos de Wagner (1971) e Reichenbächer (2010) para o corte de rochas com ferramentas de geometria definida e os estudos de Tönshoff, Hillmann-Apmann e Asche (2002), para o corte de rochas com ferramentas de geometria não definida (corte por abrasão). No entanto não se confirmaram os estudos de Uhlmann e Manthei (2015) para rugosidades superficiais e geração de cavacos na usinagem do arenito.

A avaliação das temperaturas geradas no processo de usinagem do arenito com ferramentas diamantadas permitiu concluir que a temperatura na maior parte do tempo não ultrapassou 120° C, o que permitiu executar a usinagem sem a utilização de fluido refrigerante, ainda facilitando a obtenção das imagens pela câmera de alta velocidade. Cabe salientar que a estratégia de usinagem utilizada permitiu a ferramenta sair fora da peça em usinagem após cada passe de usinagem, permitindo o resfriamento da mesma.

Para a usinagem da réplica, o menor raio de ferramenta utilizado foi 3 mm (ferramenta de ponta esférica de 6 mm de diâmetro), o que significa que rasgos ou cantos internos com raio inferior ao da ferramenta não foram possíveis usinar. Ainda assim, pode-se dizer que o erro máximo de profundidade (devido ao diâmetro da fresa utilizada) obtido nesse estudo de caso foi menor que 1,2 mm, o que é aceitável para este caso visto que a variação do tamanho do grão de areia presente no arenito estudado varia de 0,1 a 2 mm. É possível, com utilização de fresas de PCD de ponta esférica com diâmetro menor que 6 mm, diminuir em muito os erros obtidos, tornando a réplica cada vez mais fidedigna.

A usinagem do arenito com ferramentas de diamante PCD se mostrou viável tecnicamente. Vale ressaltar que o mercado ainda oferece poucas opções de geometrias dessas ferramentas. Porém, a tecnologia para fabricação de ferramentas de PCD de formas variadas já é dominada. Consiste em cortar a pastilha de PCD na forma desejada, por eletroerosão a fio e soldar sobre uma ferramenta de Metal Duro.

A integração das tecnologias 3D formando um método para produção de réplicas em arenito é uma grande contribuição da Ciência para com a preservação do patrimônio cultural. Trata-se da possibilidade de recuperação de fachadas de prédios históricos, obras de arte, reprodução de inscrições rupestres, produção de lápides com inscrições em alto ou baixo-relevo.

Sendo assim, uma importante contribuição desta pesquisa foi estabelecer parâmetros de usinagem para processamento de arenito por fresamento CNC. Neste sentido o autor indica que os parâmetros iniciais para faceamento e desbaste de arenito com ferramentas de corte de PCD de 12 mm de diâmetro são velocidade de rotação de 15.000 rpm, profundidade de corte de 1 a 2 mm, velocidade de avanço de 400 a 1000 mm/min e penetração de trabalho de 6 mm. Uma vez que com estes parâmetros foi possível usinar uma réplica de parte da Pedra Grande, eles podem ser usados como base para quem desejar processar arenito por fresamento CNC para obter a forma que desejar.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, apresento:

Estudo do mecanismo de corte do arenito com a utilização de câmera de alta velocidade, utilizando lentes que permitem obter foco com melhor nitidez, de modo a permitir entender melhor o processo de corte do arenito, com diferentes tipos de ferramentas.

Estudo da usinagem CNC do arenito com a utilização de fresadora de alta velocidade (High Speed), utilizando diferentes tipos de ferramenta.

Estudo da usinagem CNC do arenito a partir de digitalização 3D, utilizando diferentes tipos de arenito e até outros tipos de rochas.

Aprofundar os estudos da correlação entre os resultados dos ensaios de compressão axial, flexão, tração indireta e abrasão com desgaste da ferramenta cotejando as propriedades com o desgaste do gume da ferramenta.

Estabelecer diferentes rotinas de usinagem para ferramentas de geometria

definida e não definida na usinagem do arenito buscando a otimização da usinagem em cada caso específico.

Estudar a influência do fluido de corte na usinabilidade do arenito e no desgaste das ferramentas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, Carlos Rubens de Araujo. **Rochas ornamentais: manual de caracterização, aplicação e uso das principais rochas comerciais no Espírito Santo**. 1 ed. Cachoeiro do Itapemirim – ES, 2013: Instituto Euvaldo Lodi

ARAUJO, A. G. M. **As propriedades físicas dos arenitos silicificados e suas implicações na aptidão ao lascamento**. Rev. Do Museu de Arqueologia e Etnologia, S. Paulo, 2:63-74, 1992.

BARBIAN, Tamara. **Design e tecnologia: gravação a laser de desenhos no arenito**. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2015: UFRGS.

BRANCAGLION JUNIOR, A.; SANTOS, J. R. L.; FACURI, C. P.; GRILLO, O. N.; PEREIRA, João Rogério Machado. **Epigrafia egípcia / Egyptian epigraphy**. In: Jorge Lopes; Antônio Brancaglioni JR.; Sérgio Alex Azevedo; Heron Werner JR.. (Org.). **Tecnologias 3D - Desvendando o passado, modelando o futuro/ 3D Technologies - Unveiling the past, shaping the future**. 1ªed. Rio de Janeiro: Lexikon, 2013, v. 1, p. 50-53.

BURLEY, Stuart D.; WORDEN, Richard H. **Sandstone diagenesis: recent and ancient**. Malden, MA, USA, 2003: Blackwell Publishing Ltd.

BUSATO, Sérgio Luiz. **Visão e Percepção, investigação dos modelos cognitivos – uma abordagem neurobiológica em Design e Emoção**. Tese de Doutorado, Bauru-SP, 2013: UNESP.

CAMPOS, Julio Garrido et al. **Stone cutting automation based on features**. IEEE International Conference on Mechatronics, Málaga, Espanha, 2009.

CARDOSO, Eduardo; SANTOS, Sérgio Leandro dos; SILVA, Fábio Pinto da; TEIXEIRA, Fábio Gonçalves; SILVA, Tânia Luísa Koltermann da. **Tecnologias Tridimensionais para Acessibilidade em Museus**. In: XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics SIGraDi: Knowledgebased Design, 2014,

Valparaíso. Proceedings of the XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Knowledge-based Design. v. 1. p. 444-448.

CARVALHO, Cássio Santos. **Mapa e mecanismos de desgaste de compósitos diamantados de matriz metálica sinterizados**. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes-RJ, 2014: UENF.

DARWIN, Charles. **Sedimentos e rochas sedimentares**. In: PRESS; SIEVER;

DINIZ, Eduardo Anselmo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 ed. São Paulo, 2013: Artliber Editora.

ETCHEPARE, Hélio Dorneles. **Contribuição ao estudo da seleção de materiais, caracterização e processamento por fresamento em altas velocidades (HSM) no beneficiamento do riódacito (basalto carijó)**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2014: UFRGS.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo, 1970: Edgard Blücker.

FLORES, A. B. H.; SILVA, F. P.; DUARTE, L. C.; KINDLEIN JUNIOR, W.. **Design de território: técnicas de digitalização e corte a laser na preservação do patrimônio histórico**. In: 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2012, São Luís. Anais do P&D Design 2012. São Luís: EDUFMA, 2012.

FOLK, Robert L. **Petrology of sedimentary rocks**, Austin, Texas, 1980: Hemphill Publishing Company.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento: estudo por meio de ensaios e análises e das patologias associadas ao uso**. In: III Simpósio sobre Rochas Ornamentais do Nordeste. Anais, Recife, PE, 2002.

FREITAS, Gustavo. **Metodologia e aplicabilidade da digitalização 3D a laser no desenvolvimento de moldes para calçados e componentes.** Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2006: UFRGS.

GIANNINI, Paulo César F.; RICCOMINI, Cádio. **Sedimentos e processos sedimentares**, In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (orgs) 2000. *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de Textos. USP.

GIANNINI, Paulo César F. **Depósitos e rochas sedimentares**, In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (orgs) 2000. *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de Textos. USP.

GOMES, Leonardo; BELLON, Olga Regina Pereira; SILVA, Luciano. **3D reconstruction methods for digital preservation of cultural heritage: A survey.** Pattern Recognition Letters, v. 50, p. 3-14, 2014.

GREENSMITH, J.T. **Petrology of sedimentary rocks.** London, 1973: Thomas Murby & Co.

GUO, Hua. **Rock cutting studies using fracture mechanics principles.** Tese de Doutorado, Wollongong, Austrália, 1990: University of Wollongong.

HAMADE, R. F. et al. **Compact core drilling in basalt rock using PCD tool inserts: Wear characteristics and cutting forces.** Journal of Materials Processing Technology, 2010: Elsevier.

HEATH, Peter J. **Developments in applications of PCD tooling.** Journal of Materials Processing Technology, v. 116, n. 1, p. 31-38, 2001.

HOEK, Evert; BROWN, Edwin T. **Practical estimates of rock mass strength.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1997.

HONG-SEOK, Park, and Tuladhar Upendra Mani. **Development of an Inspection**

**System for Defect Detection in Pressed Parts Using Laser Scanned Data.** *Procedia Engineering* 69 (2014): 931-936.

KINDLEIN JÚNIOR, Wilson. **Estudo da síntese e caracterização de pó de diamante por altas pressões.** Tese de Doutorado, Porto Alegre, 1999: UFRGS.

KONSTANTY, Janusz. **Theoretical analysis of stone sawing with diamonds.** *Journal of materials processing technology*, v. 123, n. 1, p. 146-154, 2002.

KONSTANTY, Janusz. **Powder metalurgy diamond tools.** London, 2005: Elsevier.

KOVACS, Laszlo, et al. **Comparison between breast volume measurement using 3D surface imaging and classical techniques.** *The Breast* 16.2 (2007): 137-145.

LOPES, Jorge et al. (orgs). **Tecnologias 3D: desvendando o passado, modelando o futuro.** Rio de Janeiro, 2013: Lexicon.

MACHADO, Alisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos metais.** 2 ed. São Paulo, 20011: Editora Edgard Blucher.

MADUREIRA FILHO, J.B.; ATENCIO, Daniel; McREATH, Ian. **Minerais e rochas**, In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (orgs) 2000. *Decifrando a Terra.* São Paulo: Oficina de Textos. USP.

NEIS, P. D., N. F. Ferreira, and F. P. da Silva. **Comparison between methods for measuring wear in brake friction materials.** *Wear* 319.1 (2014): 191-199.

NICHOLS, Gary; **Sedimentology and stratigraphy.** 2.ed. Hoboken, USA, 2009: Wiley-Blackwell.

OLIVEIRA, Lizete dias de. **A arte rupestre como signo: uma abordagem semiótica do fenômeno infocomunicacional.** Piauí/Brasil, 2009. Congresso Internacional da IFRAO.



PATETE, Paolo, et al. **Comparative assessment of 3D surface scanning systems in breast plastic and reconstructive surgery.** Surgical innovation 20.5 (2013): 509-515.

PARK, Ji-Hee, et al. **Antagonist wear of three CAD/CAM anatomic contour zirconia ceramics.** The Journal of prosthetic dentistry 111.1 (2014): 20-29.

PEREIRA, João Rogério Machado; KINDLEIN JUNIOR, W. ; SILVA, F. P. **Usinagem de arenito e tecnologias 3D.** In: Maciel Donato, Lauren da Cunha Duarte e Léo Afranio Hartmann. (Org.). Inovação, Design e Pesquisas aplicadas em gemas, Joias e Mineração. 1ed. Porto Alegre, RS: IGEO - UFRGS, 2015, v. 1, p. 50-57.

PEREIRA, João Rogério Machado; DE LIMA E SILVA PENZ, Ivan; SILVA, Fabio P. **Effects of different coating materials on three-dimensional optical scanning accuracy.** Advances in Mechanical Engineering, v. 11, n. 4, p. 1687814019842416, 2019.

PETTIJOHN, F.J.; POTTER, Paul Edwin; SIEVER, Raimond. **Sand and sandstone.** New York: Springer – Verlag, 1973.

PETTIJOHN, F.J. **Rocas sedimentárias.** 2.ed. Buenos Aires, Enero 1970: Editora Universitaria de Buenos Aires. PETTIJOHN, F.J. **Sedimentary rocks.** 2.ed. New York, 1957: Harper & Row.

POHLMANN, Mariana et al. **O uso da tecnologia da digitação tridimensional na documentação de inscrições rupestres: Estudo de caso do Abrigo da Pedra Grande.** VI Workshop Design & Materiais, Bauru, SP, 2012.

POHLMANN, Mariana et al. **Design and territory: laser cutting/engraving applied in the manufacture of products for the promotion of the Pedra Grande archeological site, RS, Brazil.** In: Proceedings of the 2011 Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces. ACM, 2011. p. 41.

POLINI, W.; TURCHETTA, S. **Force and specific energy in stone cutting by diamond mill**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, n. 11, p. 1189-1196, 2004.

REICHENBÄCHER, Holger. **Trennen mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmten Schneiden**. Kassel, Alemanha, 2010: Kassel University.

ROSSI, W. S.; SILVA, F. P.; KINDLEIN JUNIOR, W.. **A utilização de modelos 3D para a preservação e divulgação de peças do patrimônio histórico e cultural: estudo de caso com escarradeira e urinol**. Arcos Design (Online), v. 7, p. 69-79, 2014.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo, 2007: Artliber.

SANTOS, S.I. **Adesão de filme auto-sustentado de diamante CVD em metal duro**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2004: UFRGS.

SCHMITZ, Pedro Ignacio; BROCHADO, José Proenza. **Petroglifos do estilo pisadas no centro do Rio Grande do Sul. Abrigos de Canhembora, Lajeado dos Dourados, Linha Sétima e Pedra Grande**. Pesquisas. Antropologia, n. 34, p. 3-47, 1982.

SGARBI, Geraldo. N. C. **Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas**. 2 ed. Belo Horizonte, 2007: Ed. da UFMG.

SILVA, Fábio Pinto. **O uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2006: UFRGS.

SILVA, Fábio Pinto. **Usinagem de espumas de poliuretano e digitalização tridimensional para fabricação de assentos personalizados para pessoas com deficiência**. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 2011: UFRGS.

SILVA, Fábio Pinto et al. **A digitalização tridimensional móvel e sua aplicação no design de produto**. Design & Tecnologia, Pgdesign, Porto Alegre, 2010: UFRGS.

SILVA, F. P.; CALDOVINO, G. C.. **Produção de réplicas acessíveis de peças museológicas via impressão 3D por filamento termoplástico**. In: IV International Conference on Design, Engineering, Management for innovation - IV Conferência Internacional de Design, Engenharia e Gestão para a inovação, 2015, Florianópolis. Anais do IDEMi 2015. Florianópolis: UDESC, 2015. v. 1. p. 1726-1737.

SIRAT, Gabriel; PSALTIS, Demetri. **Conoscopic holography**. Optics letters, v. 10, n. 1, p. 4-6, 1985.

SPAGNOLO, Giuseppe Schirripa; COZZELLA, Lorenzo; SIMONETTI, Carla. **Linear conoscopic holography as aid for forensic handwriting expert**. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, v. 124, n. 15, p. 2155-2160, 2013.

STOBER, Thomas, et al. **Comparability of clinical wear measurements by optical 3D laser scanning in two different centers**. Dental Materials 30.5 (2014): 499-506.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Processos de usinagem: fabricação por remoção de material**. Apostila. Florianópolis, 2004: UFSC.

SUMMERS, Andrew, et al. **Investigating the measurement of offshore wind turbine blades using coherent laser radar**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 41 (2016): 43-52.

TESSMANN, Camila. **Importância do binômio design e engenharia no beneficiamento de rejeito mineral de opala e ágata na produção de camafeus por usinagem CNC**. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2009: UFRGS.

TILLMANN, Wolfgang. **Trends and market perspectives for diamond tools in the construction industry**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 18, n. 6, p. 301-306, 2000.

TÖNSHOFF, H.K.; HILLMANN-APMANN, H.; ASCHE, J. **Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications.** Diamond and related materials. 2002.

UHLMANN, Eckart; MANTHEI, Marcel. **Analysis of the cutting process for milling of marble and sandstone with an end mill cutter.** In: International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM). 2015. p. 54-60.

VALINO, Gonzalo et al. **Measurement and correction of the slope angle of flat surfaces digitized by a conoscopic holography system.** Precision Engineering, v. 46, p. 369-376, 2016.

VILLANUEVA, Antônio Emel López. **Produção de novos materiais carbonáceos por altas pressões.** Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2003: UFRGS.

WAGNER, H. **Der Mechanismus der Spanentstehung beim Zerspanen von Gesteinen.** Rock Mechanics 3 , 159-171, 1971: Springer – Verlag.

WU, Fu-Tai; CETANO-CHANG, Maria Rita. **Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no centro-leste do estado de São Paulo.** Revista IG, jan/jun 1992: São Paulo.

YARALI, O. et al. **A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks.** International Journal of Coal Geology, v. 74, n. 1, p. 53-66, 2008.

YUN, Ho Hyun, et al. **Reliability of a PowerPoint method for wear measurement after total hip arthroplasty: a retrieval study using 3-dimensional laser scanning.** The Journal of arthroplasty 27.8 (2012): 1530-1537.

<http://www.saopedrodosul.net/spedro.htm> – visitado em 05/03/2014.

<http://www.geografos.com.br/cidades-rio-grande-do-sul/sao-pedro-do-sul.php> – visitado em 13/09/2017.

<http://www.breton.it/fabshop>- visitado em 13/03/2014.

<http://www.centrorochas.org.br> – visitado em 14/03/2014.

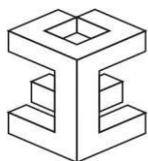
<http://belezasdesaopedrodosul.blogspot.com.br/p/guia-turistico.html> - visitado em 13/09/2017

<https://www.google.com.br/#q=google+maps> – visitado em 10/03/2014

<http://cidades.ibge.gov.br> – visitado em 10/01/2014

[http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/04/150424\\_caverna\\_replica\\_lk](http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/04/150424_caverna_replica_lk)  
<https://www.konicaminolta.com> – visitado em 14/09/2017

## APÊNDICE A – ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS



### FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT

Entidade Técnico Cultural Criada em 1965  
Rua Matias José Bins 364 : Bairro Três Figueiras : CEP 91330-290  
PORTO ALEGRE : RS : BRASIL  
Fone: (51) **3286.4333 / 3286.4343** : E-mail: [fle@fle.org.br](mailto:fle@fle.org.br)

## Relatório de Ensaio de Amostra de Rocha

**Cliente:** João Rogério Machado Pereira

**Tipo de litologia:** Arenito 45° - Arenito Perpendicular

### Ensaios Realizados:

- a. Módulo de Young
- b. Ensaio Triaxial
- c. Ensaio de tração Indireta (ensaio brasileiro)
- d. Determinação das propriedades físicas
- e. Ensaio de flexão

As amostras de rocha foram recebidas na forma de bloco maciço de rocha, e extraídas para a forma de testemunho de sondagem utilizando perfuratriz de coroa diamantada com diâmetro de 47 mm. Posteriormente foram cortadas na proporção de 2:1 (altura/diâmetro) para obtenção dos corpos de prova.

Foram especificados os seguintes ensaios para o arenito 45° com a foliação:

- 8 ensaios de compressão triaxial (dois ensaios por tensão confinante).
- 6 ensaios de tração indireta (ensaio brasileiro).

Foram especificados os seguintes ensaios para o arenito perpendicular com a foliação:

- 7 ensaios de compressão triaxial (dois ensaios por tensão confinante).

- 5 ensaios de tração indireta (ensaio brasileiro).

Foram especificados os seguintes ensaios para arenito:

- 7 ensaios de flexão.
- Foram especificadas 20 amostras para o ensaio de propriedades físicas.

Os ensaios seguiram as normas específicas utilizadas para esses ensaios no laboratório de mecânica de rochas.

- Ensaio de compressão triaxial; norma técnica da ASTM D2664.
- Ensaio de tração indireta (ensaio brasileiro); norma técnica ASTM D3967.
- Ensaio de determinação das propriedades físicas; norma técnica ABNT NBR 15845:2010.
- Ensaio de flexão; norma técnica ABNT NBR 15845:2010.

A preparação dos corpos-de-prova foi feita com serra diamantada e as faces foram serradas paralelas e lisas, com diferença de paralelismo máximo de 0,02 mm, conforme especificação de norma.

O ensaio de compressão triaxial foi realizado em prensa servo-controlada da marca Controls com 200 t (2000 kN) de capacidade e controle de carga de 500 N/s.

As medidas das deformações axiais foram realizadas por meio de LVDT com curso máximo de 10 mm.

O ensaio de tração indireta foi realizado em point-load com capacidade de 400 bar.

Os ensaios de flexão foram realizados em prensa instrumentada da marca controls com 150 t (1500 kN) de capacidade.

O módulo de Young foi calculado utilizando o módulo médio, onde foi calculada a relação entre tensão e deformação ( $\sigma/\epsilon_a$ ) no valor de 50% da tensão máxima admissível.

### Ensaio de compressão triaxial

Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM D2664. Foram preparados 7 corpos de prova para cada tipo de litologia, dentro das especificações litológicas da rocha. A razão altura/diâmetro foi aproximadamente de 2:1.

Os parâmetros, diâmetro e altura foram medidos no Laboratório de Mecânica de Rochas, com auxílio de paquímetro digital.

As medidas das deformações axiais foram realizadas por meio do deslocamento do crossover da prensa com curso máximo de 10mm.

Foram definidas três tensões de confinamento ( $\sigma_3$ ) para os testes de compressão triaxial: 2, 5 e 7 MPa.

A tabela no anexo mostra os resultados do ensaio de compressão triaxial para cada litotipo e a sua média final. As médias para as duas litologias são mostradas na tabela abaixo.

Resultados médios do ensaio Triaxial para cada litotipo e tensão confinante.

$\sigma_3$	Arenito 45°	Arenito Perpendicular
2MPa	47.06	55.52
5MPa	70.12	71.90
7MPa	76.91	81.71

Os resultados mostram aumento da tensão axial (resistência) com o aumento da tensão de confinamento, o que mostra que os ensaios atendem a tendência esperada para este tipo de ensaio.

A determinação da coesão e ângulo de atrito foi baseada no 'Geological Strength Index', (GSI), de autoria de Hoek & Brown. Esta avaliação é baseada na observação das características das amostras de rocha, por meio de testemunho de



sondagem. Outro fator analisado é a resistência uniaxial média da rocha, obtida através de ensaios e estimada para o maciço rochoso. A condição adotada é a estimativa da coesão e ângulo de atrito para o maciço rochoso a partir dos testemunhos de sondagem e ensaio triaxial. Neste ensaio foi adotado o valor de 100 para o GSI por se tratar de ensaio para rocha intacta.

Os gráficos em anexo mostram as envoltórias de Mohr e os resultados dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) para cada litotipo.

### **Ensaio de tração indireta (ensaio brasileiro)**

Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM D3967. Foram preparados 5 corpos de prova para cada tipo de litologia, dentro das especificações litológicas da rocha. A razão altura/diâmetro foi aproximadamente de 1:1.

Os parâmetros, diâmetro e altura foram medidos no Laboratório de Mecânica de Rochas, com auxílio de paquímetro digital.

Os resultados mostram que as amostras de arenito 45° possuem resistência média à tração de 1.94 MPa.

Os resultados mostram que as amostras de arenito perpendicular possuem resistência média à tração de 1.41 MPa.

Arenito 45°				
Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Razão (h/D)	$\sigma_t$ (MPa)
A9	49.63	41.16	0.83	1.99
A10	49.66	39.60	0.80	1.85
A11	49.71	39.36	0.79	1.86
A12	49.55	35.86	0.72	1.64
A13	49.66	39.93	0.80	2.64
A14	49.6	42.96	0.87	1.66
Média aritmética				1.94
Desvio padrão				0.37
Coeficiente de variação				0.19

Arenito Perpendicular				
Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Razão (h/D)	$\sigma_t$ (MPa)
B8	49.8	29.10	0.58	1.60
B9	49.3	30.26	0.61	1.28
B10	49.6	20.85	0.42	1.27
B11	49.78	29.92	0.60	1.57
B12	49.6	38.27	0.77	1.30
Média aritmética				1.41
Desvio padrão				0.16
Coeficiente de variação				0.12

## Ensaio de Propriedades Físicas

Este ensaio foi realizado com base na norma ABNT NBR 15845:2010. Foram preparados 20 corpos de prova. A razão altura/diâmetro foi aproximadamente de 1:1.

A massa das amostras foi pesada utilizando uma balança de precisão com limite máximo de 3500 g, limite mínimo de 0,5 g e erro de 0,1 g.

Os resultados do ensaio de propriedades físicas mostram que as amostras de arenito analisadas possuem densidade aparente de 2110,58 Kg/m<sup>3</sup> com um desvio padrão de 11,79, porosidade aparente de 15,33% com um desvio padrão de 1,01, absorção de água aparente de 7,27% com um desvio padrão de 0,50 e umidade de 0,63% com um desvio padrão de 0,14.

Pode-se concluir que a rocha além de conter poucos espaços vazios também é capaz de absorver (absorção aparente) uma quantidade muito baixa de água. Esse comportamento é devido as propriedades dos minerais encontrados nessa rocha.

Amostra	Massa Natural (g)	Msec (g)	Msat (g)	Msub (g)	Densidade Aparente ( $\rho_a$ ) kg/m <sup>3</sup>	Porosidade Ap. ( $\eta_a$ ) %	Absorção de Água Ap. (%)	Umidade (%)
A1	135,89	135,01	144,37	80,35	2108,87	14,62	6,93	0,65
A2	137,46	136,60	146,52	81,56	2102,83	15,27	7,26	0,63
A3	71,44	70,59	75,84	42,46	2114,74	15,73	7,44	1,20
A4	74,27	73,83	79,12	44,36	2123,99	15,22	7,17	0,60
A5	75,22	74,76	80,35	44,99	2114,25	15,81	7,48	0,62
A6	91,99	91,42	98,04	54,95	2121,61	15,36	7,24	0,62
A7	70,81	70,47	75,57	42,29	2117,49	15,32	7,24	0,48
A8	57,91	57,54	61,95	34,53	2098,47	16,08	7,66	0,64
A9	163,69	162,72	174,71	97,13	2097,45	15,46	7,37	0,60
A10	56,67	56,33	60,63	33,95	2111,32	16,12	7,63	0,60
B1	105,61	104,97	112,58	62,81	2109,10	15,29	7,25	0,61
B2	153,52	152,64	163,95	91,16	2096,99	15,54	7,41	0,58
B3	163,94	162,99	174,86	97,54	2107,99	15,35	7,28	0,58
B4	143,40	142,55	153,37	85,23	2092,02	15,88	7,59	0,60
B5	185,20	184,09	197,54	110,23	2108,46	15,40	7,31	0,60
B6	187,32	186,20	196,07	109,18	2142,94	11,36	5,30	0,60
B7	223,03	221,74	238,10	132,74	2104,59	15,53	7,38	0,58
B8	102,16	101,57	108,84	61,05	2125,34	15,21	7,16	0,58
B9	45,43	45,17	48,60	27,17	2107,79	16,01	7,59	0,58
B10	67,57	67,16	72,30	40,40	2105,33	16,11	7,65	0,61
Média Aritmética					2110,58	15,33	7,27	0,63
Desvio Padrão					11,79	1,01	0,50	0,14
Coef. de Variação					0,01	0,07	0,07	0,22

## Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão foi realizado com base na norma ABNT NRB 15845:2010.

Este tem como objetivo determinar a resistência à Flexão por carregamento em três pontos (módulo de ruptura).

Os parâmetros, largura, espessura e altura foram medidos no Laboratório de Mecânica de Rochas, com auxílio de paquímetro digital.

Foram utilizados 7 corpos de prova, estes foram preparados de acordo com a norma, com formato retangular nas dimensões de (50x100x200) mm.

Os resultados mostram que as amostras possuem uma resistência média à flexão de 16.34 MPa.

Arenito					
Ensaio Flexão					
Amostra/Ensaio Realizado	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Vão entre roletes (mm)	Tensão de ruptura (Mpa)
F1/Flexão	50.57	100.43	198.00	126.00	9.01
F2/Flexão	52.60	99.15	198.00	126.00	15.48
F3/Flexão	51.15	99.10	200.00	126.00	17.27
F4/Flexão	51.80	98.96	200.00	126.00	17.44
F5/Flexão	49.80	99.44	200.00	126.00	19.71
F6/Flexão	51.80	98.96	200.00	130.00	16.50
F7/Flexão	51.60	99.32	200.00	146.00	18.95
Média Aritmética					16.34
Desvio Padrão					3.53
Coeficiente de Variação					0.2159

## Considerações

O ensaio de compressão triaxial é uma informação importante para efeitos de entendimento de comportamento da rocha e sua resistência. Entretanto, se deve salientar que esse resultado não pode ser utilizado para representar a resistência do maciço rochoso, porque a resistência do maciço rochoso é controlada pela resistência à compressão simples e pela quantidade e qualidade das descontinuidades

Os parâmetros de resistência acima são representativos para a rocha intacta, porque o valor da classificação GSI imposto para o cálculo dos parâmetros foi de 100. Para obter os parâmetros para o maciço rochoso deve-se incluir os índices de qualidade e quantidade das descontinuidades para definir a classificação geomecânica do maciço e, por consequência, a redução do valor para o ângulo de atrito e coesão.

Portanto, para realizar qualquer estudo de comportamento do maciço rochoso e desenho de estrutura de contenção se deve realizar uma caracterização geomecânica que contemple os ensaios que foram realizados e apresentados nesse relatório, junto com uma descrição da quantidade e qualidade das descontinuidades a partir dos testemunhos de sondagem ou diretamente no maciço rochoso (em escavações).

Porto Alegre, 5 de novembro de 2014.

  
Andre Zingano

Prof. Dr. Eng. de Minas

## **Anexo**

Anexo 1 – Compressão Triaxial

Anexo 2 – Gráficos da Envoltória da Mohr

Anexo 3 – Fotos Ensaio Triaxial

Anexo 4 – Tração Indireta

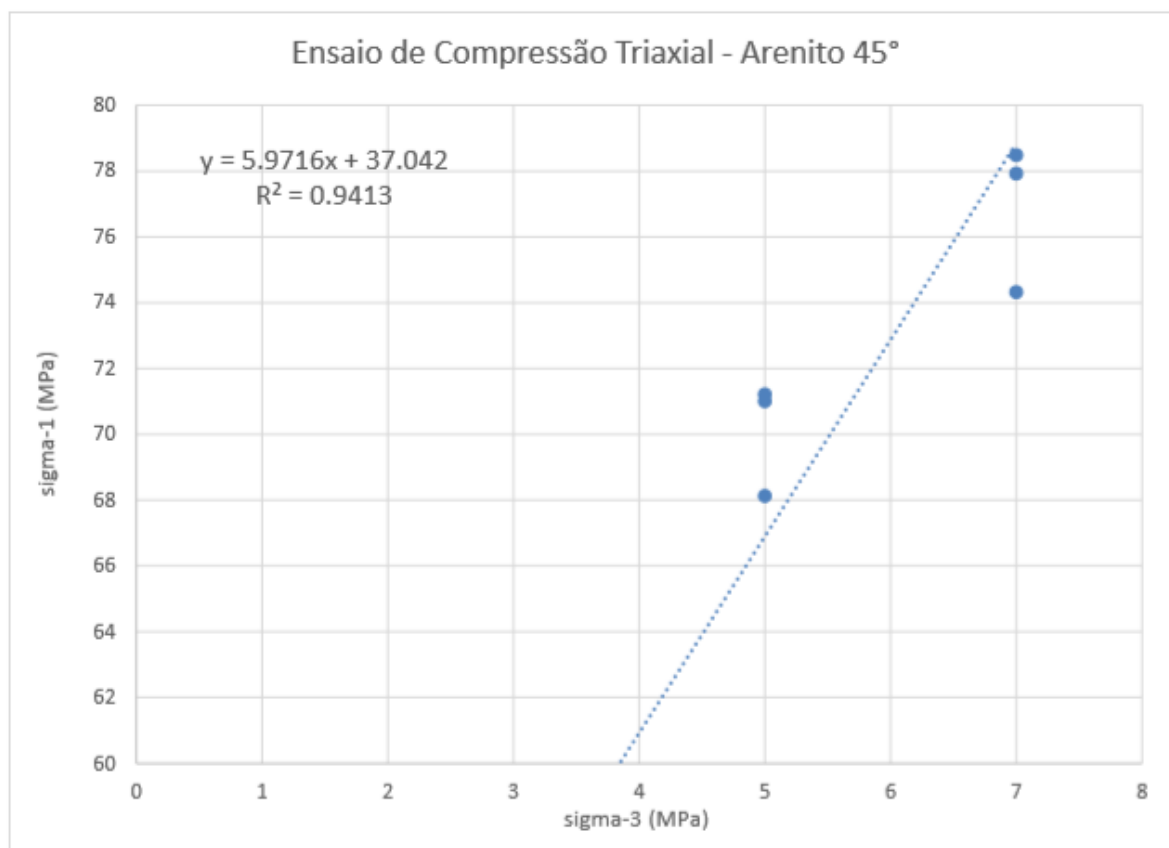
Anexo 5 – Fotos Ensaio Propriedades Físicas

Anexo 6 – Fotos Ensaio Flexão

## Anexo 1 – Resultados dos Ensaios de Compressão Triaxial

Arenito 45°						
Ensaio Triaxial						
Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Razão (h/D)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	E (GPa)
A1	49.62	105.57	2.13	46.39	2.00	9.49
A2	49.58	104.27	2.10	47.72	2.00	11.98
A3	49.53	108.18	2.18	71.00	5.00	12.33
A4	49.61	100.00	2.02	68.13	5.00	11.22
A5	49.59	110.81	2.23	78.49	7.00	13.19
A6	49.57	105.64	2.13	77.93	7.00	12.06
A7	49.68	104.86	2.11	74.33	7.00	10.99
A8	49.63	108.31	2.18	71.21	5.00	9.67
Média Aritmética (Tri)				66.90		11.37
Desvio Padrão (Tri)				12.74		1.29

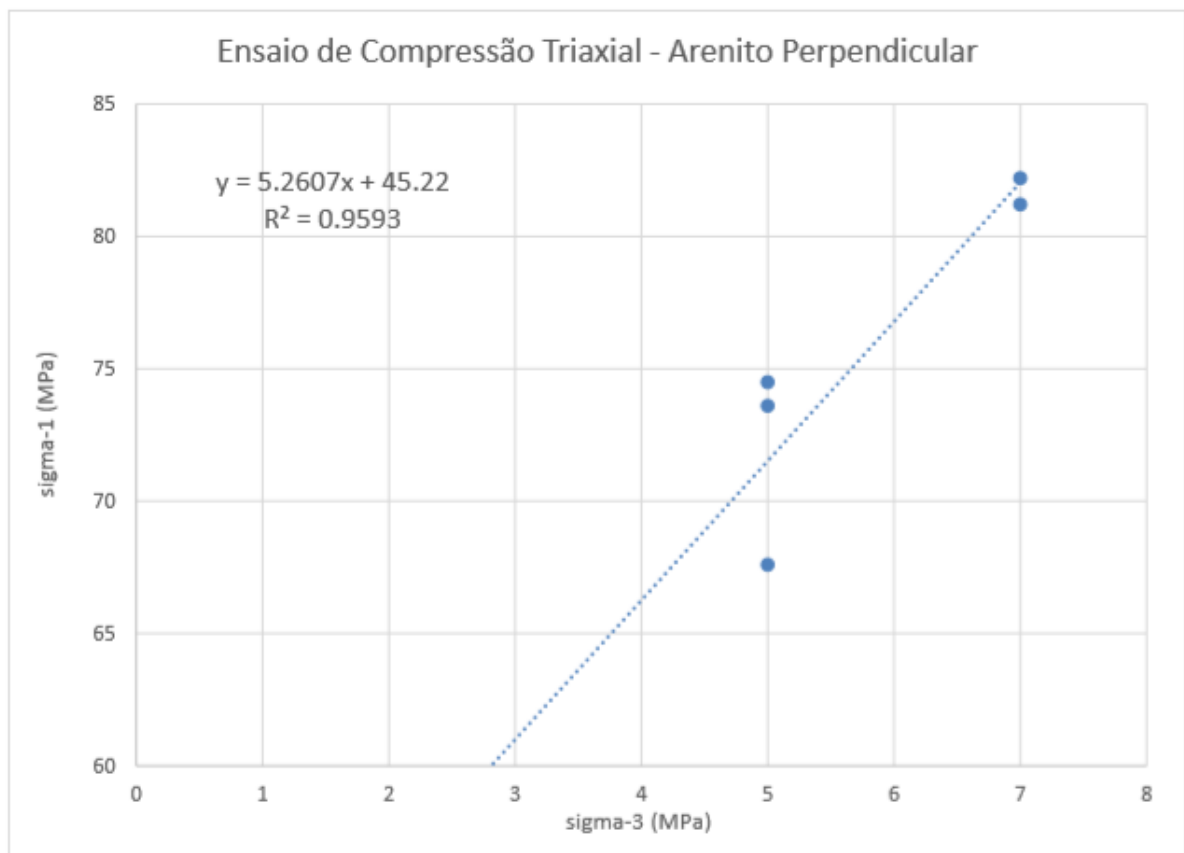
Arenito 45°						
Ensaio Triaxial - RockData						
Amostra	Resist. Rocha (Mpa)	Módulo Young (Mpa)	Poisson	Coesão (Mpa)	Ângulo de Atrito (°)	mi
45°	30.491	98194.20	0.25	5.313	50.36°	19.96



Arenito Perpendicular						
Ensaio Triaxial						
Amostra	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Razão (h/D)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	E (GPa)
B1	49.73	101.19	2.03	55.99	2.00	11.51
B2	49.60	105.17	2.12	55.04	2.00	15.74
B3	49.59	110.10	2.22	74.50	5.00	11.74
B4	49.61	102.54	2.07	67.60	5.00	8.78
B5	49.61	101.15	2.04	73.60	5.00	10.39
B6	49.50	96.05	1.94	81.21	7.00	10.09
B7	49.59	97.16	1.96	82.20	7.00	10.30
Média Aritmética (Tri)				70.02		11.22
Desvio Padrão (Tri)				11.06		2.22



Arenito						
Ensaio Triaxial - RockData						
Amostra	Resist. Rocha (Mpa)	Módulo Young (Mpa)	Poisson	Coesão (Mpa)	Ângulo de Atrito (°)	mi
Perpendicular	42.142	115440.33	0.25	7.492	48.06	12.851



## **Anexo 2 – Envoltórias de Mohr e cálculo dos parâmetros de resistência**

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData

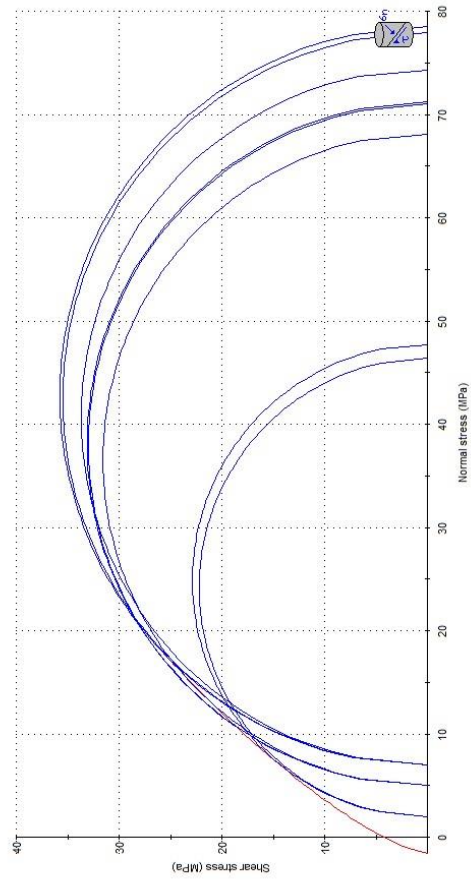
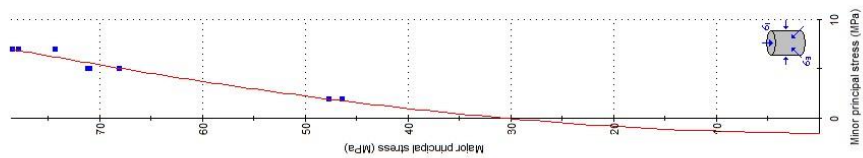
**Hoek-Brown Classification**  
 intact uniaxial compressive strength = 30.491 MPa  
 GSI = 100    mi = 19.66    Disturbance factor = 0

**Hoek-Brown Criterion**  
 mb = 19.660    s = 1.0000    a = 0.500

**Mohr-Coulomb Fit**  
 cohesion = 5.313 MPa    friction angle = 50.36 deg

**Rock Mass Parameters**  
 tensile strength = -1.351 MPa  
 intact compressive strength = 30.491 MPa  
 uniaxial compressive strength = 29.865 MPa  
 modulus of deformation = 88194.20 MPa

**Analysis of TRIAXIAL Lab Data**  
 No. of lab data points = 8  
 Sum square of errors (Residuals) = 45.769  
 Current strength model is LEVENBERG-MARQUARDT 'best-fit'



Envoltória de Mohr e cálculo dos parâmetros de resistência para o Arenito 45°

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData

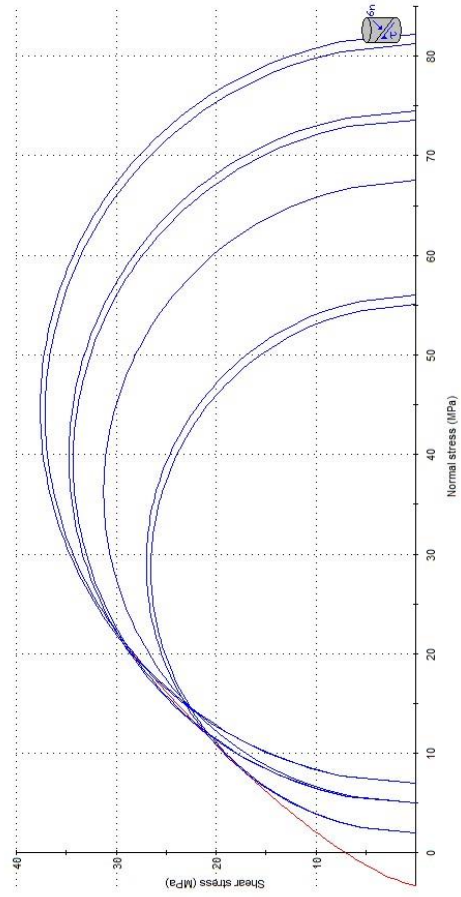
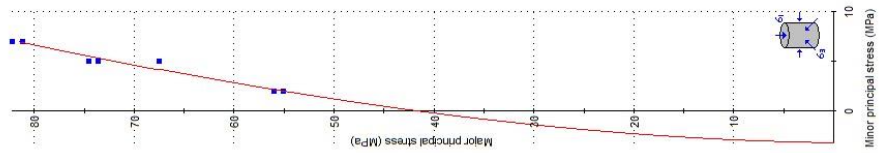
**Hoek-Brown Classification**  
 intact uniaxial compressive strength = 42.142 MPa  
 GSI = 100    mi = 12.851    Disturbance factor = 0

**Hoek-Brown Criterion**  
 mb = 12.851    s = 1.0000    a = 0.500

**Mohr-Coulomb Fit**  
 cohesion = 7.462 MPa    friction angle = 48.06 deg

**Rock Mass Parameters**  
 tensile strength = -3.279 MPa  
 uniaxial compressive strength = 42.142 MPa  
 global strength = 39.491 MPa  
 modulus of deformation = 115440.33 MPa

**Analysis of TRIAXIAL Lab Data**  
 No. of lab data points = 7  
 Sum square of errors (Residuals) = 28.986  
 Current strength model is LEVENBERG-MARQUARDT 'best-fit'

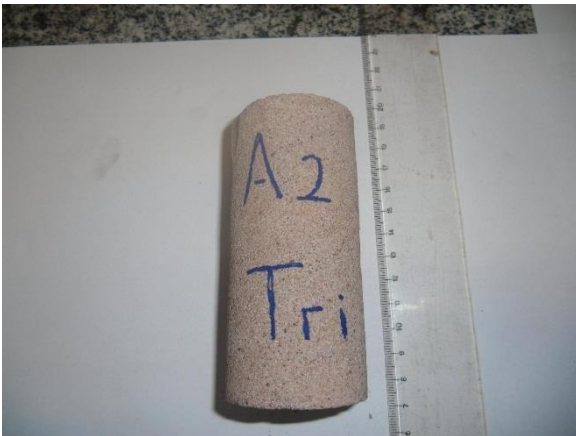


Envoltória de Mohr e cálculo dos parâmetros de resistência para o Arenito Perpendicular

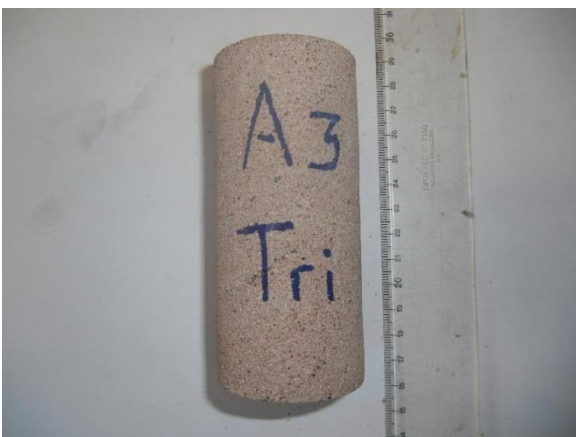
**Anexo 3 – Fotos Ensaio Triaxial**



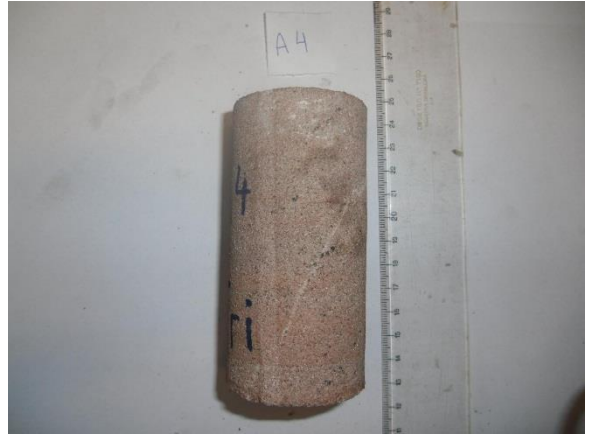
Amostra A1 – Triaxial – Arenito 45°



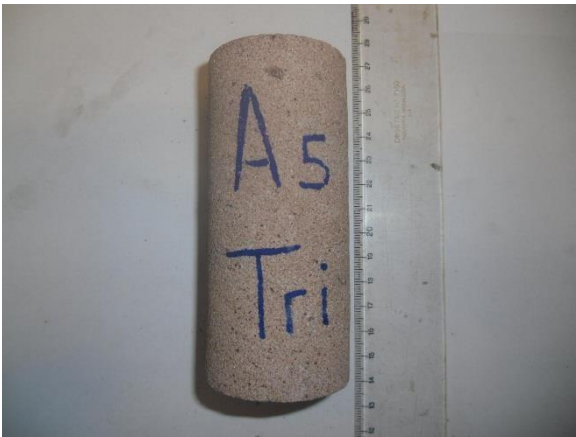
Amostra A2 – Triaxial – Arenito 45°



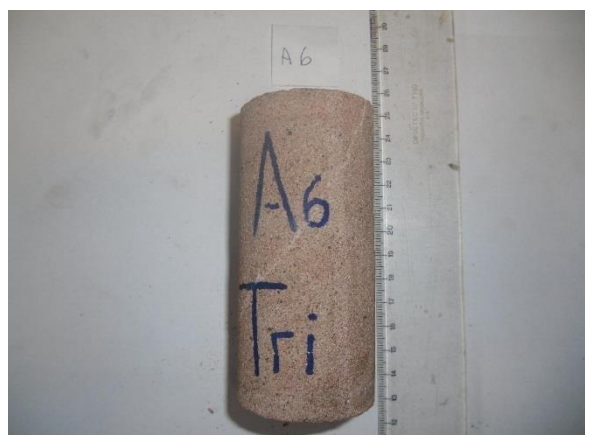
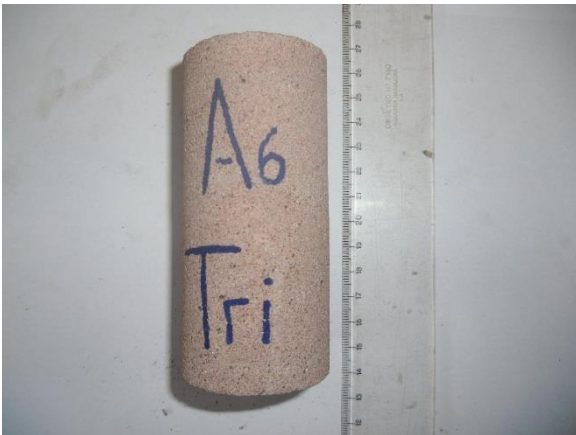
Amostra A3 – Triaxial – Arenito 45°



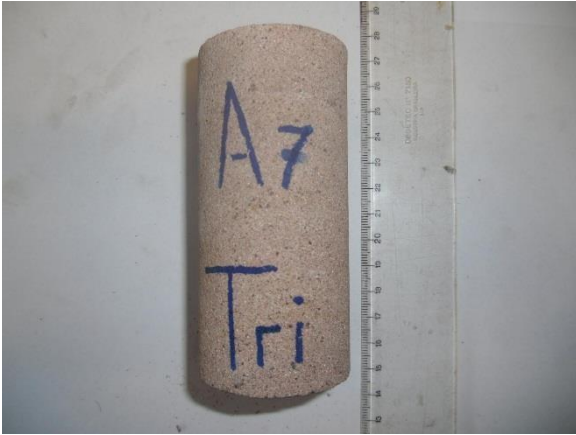
Amostra A4 – Triaxial – Arenito 45°



Amostra A5 – Triaxial – Arenito 45°



Amostra A6 – Triaxial – Arenito 45°



Amostra A7 – Triaxial – Arenito 45°



Amostra A8 – Triaxial – Arenito 45°



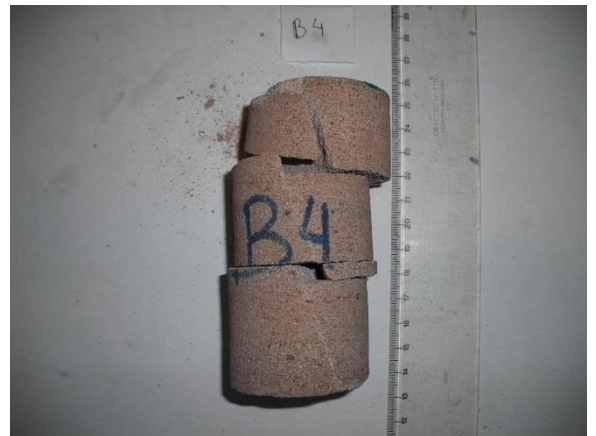
Amostra B1 – Triaxial – Arenito Paralelo



Amostra B2 – Triaxial – Arenito Paralelo



Amostra B3 – Triaxial – Arenito Paralelo

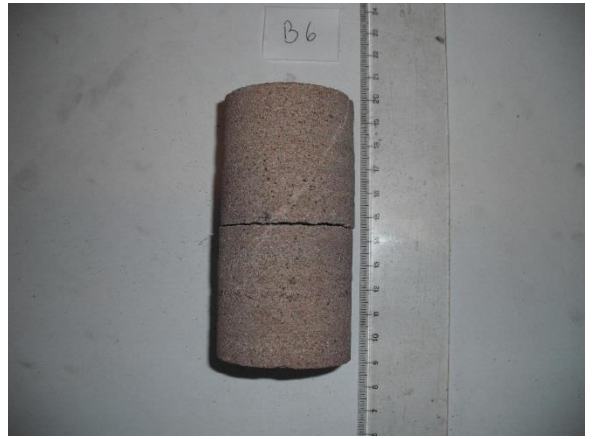


Amostra B4 – Triaxial – Arenito Paralelo





Amostra B5 – Triaxial – Arenito Paralelo



Amostra B6 – Triaxial – Arenito Paralelo



Amostra B7 – Triaxial – Arenito Paralelo

**Anexo 4 – Fotos Ensaio Tração**

Amostra A9 – Tração – Arenito 45°



Amostra A10 – Tração – Arenito 45°



Amostra A11 – Tração – Arenito 45°



Amostra A12 – Tração – Arenito 45°



Amostra A3 – Tração – Arenito 45°



Amostra A14 – Tração – Arenito 45°



Amostra B8 – Tração – Arenito Paralelo



Amostra B9 – Tração – Arenito Paralelo



Amostra B10 – Tração – Arenito Paralelo



Amostra B11 – Tração – Arenito Paralelo



Amostra B12 – Tração – Arenito Paralelo

### Anexo 5 – Fotos Ensaio Propriedades Físicas



Amostras Submersas em Água







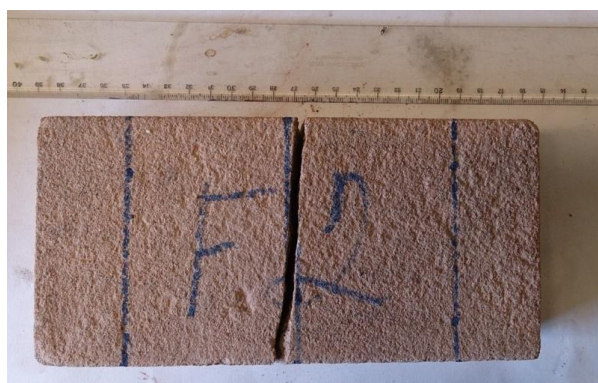


**Anexo 6 – Fotos Ensaio Flexão**

Amostra F1 – Flexão



Amostra F2 – Flexão



Amostra F3 – Flexão





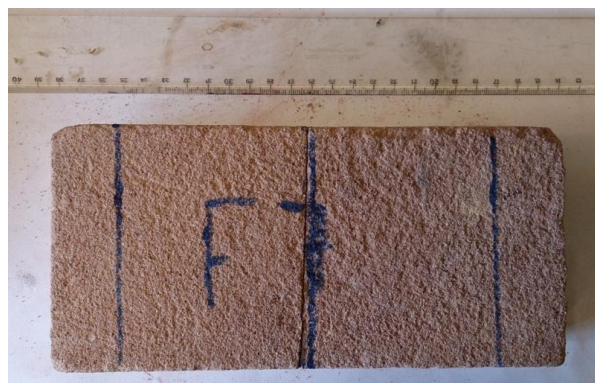
Amostra F4 – Flexão



Amostra F5 – Flexão

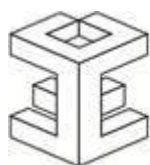


Amostra F6 – Flexão



Amostra F7 – Flexão

## APÊNDICE B – ENSAIOS DE ABRASIVIDADE CERCHAR



**FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT**

Entidade Técnico Cultural Criada em 1965

Rua Matias José Bins 364 : Bairro Três Figueiras : CEP 91330-290

PORTO ALEGRE : RS : BRASIL

Fone: (51) 3286.4333 / 3286.4343 : E-mail: fle@fle.org.br

### Relatório de Ensaio de Amostra de Rocha

**Cliente:** João Rogério

**Material Ensaiado:** Arenito

**Data do recebimento:** Maio/2015

**Ensaio Solicitados:** Determinação do índice de abrasividade CERCHAR (CAI).

### Introdução

O índice de abrasividade CERCHAR corresponde à abrasividade da rocha, analisando o desgaste sofrido por ponteiros metálicos após contato por pressão, atrito e deslocamento entre a ponteira e um corpo-de-prova da amostra rochosa.

A abrasividade depende dos minerais que constituem as rochas e da ligação entre seus grãos.

### Materiais e Métodos

O ensaio para determinar o CAI (*Cerchar Abrasivity Index*), é conduzido em um aparelho padrão (Figura 1, Anexo A), constituído de morsa (para fixação da amostra), mandril (para fixação da ponteira metálica), alavanca (responsável pelo deslocamento de 10 mm da ponteira sobre o corpo-de-prova), peso (que gera uma carga de 70 N no ponto em que ocorre a interação entre a ponteira e o corpo-de-prova), microscópio ou lupa, ponteira metálica produzida com aço temperado e resistência de 200 kgf/cm<sup>2</sup>.

As amostras coletadas em campo devem ser representativas de toda a área rochosa analisada, e os fragmentos de corpo-de-prova devem ser preparados

apenas com a utilização de martelo ou marreta. Os fragmentos devem apresentar uma superfície plana fresca, sem rugosidades que possam interferir no deslocamento da ponteira sobre a amostra.

O ensaio consiste no deslocamento e interação de uma ponteira metálica sobre a superfície de uma amostra de rocha por uma distância de 10 mm com carga normal de 70 N. A deformação sofrida pela ponteira metálica é determinada a partir da média de duas medidas perpendiculares do diâmetro da superfície resultante do desgaste com o uso do microscópio, e a abrasividade CERCHAR é determinada segundo a equação:

$$CAI = 10 \times \frac{d}{c}$$

Onde,

*CAI* Cerchar Abrasivity Index

*d* diâmetro do desgaste da ponteira (mm)

*c* fator de correção de unidade ( $c = 1$  mm)

## Resultados

### Arenito Perpendicular à foliação

**Tabela 1.** Resultados dos diâmetros das deformações nas ponteiros metálicas e índice de abrasividade CERCHAR para cada amostra ensaiada.

Amostra	Diâmetro			$\phi$ [mm]	CAI
	med. 1	med. 2	médio		
1	0,70	0,60	0,65	0,091	0,91
2	0,80	0,80	0,80	0,112	1,12
3	0,90	1,00	0,95	0,133	1,33
4	0,60	0,60	0,60	0,084	0,84
5	0,40	0,50	0,45	0,063	0,63
6	1,00	0,90	0,95	0,133	1,33
7	1,00	1,20	1,10	0,154	1,54
8	1,30	1,30	1,30	0,182	1,82
9	1,00	1,00	1,00	0,140	1,40
10	1,00	0,80	0,90	0,126	1,26

**Tabela 2.** Resultado do ensaio e classificação da rocha ensaiada.

CAI (CERCHAR Abrasivity Index)			
média (X)	desvio padrão ( $\sigma$ )	coeficiente de variação ( $\delta$ )	Classificação
1,22	0,35	0,29	<b>Abrasividade média</b>

Conforme os resultados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, conclui-se que a amostra arenito perpendicular ensaiada apresenta índice de abrasividade CERCHAR **CAI = 1,22**, e segundo os parâmetros descritos nas normas, sua classificação é **abrasividade média**.

## Arenito Paralelo à foliação

**Tabela 3.** Resultados dos diâmetros das deformações nas ponteiros metálicas e índice de abrasividade CERCHAR para cada amostra ensaiada.

Amostra	Diâmetro			Ø [mm]	CAI
	med. 1	med. 2	médio		
1	1,00	1,10	1,05	0,147	1,47
2	0,90	0,90	0,90	0,126	1,26
3	0,40	0,50	0,45	0,063	0,63
4	1,10	1,30	1,20	0,168	1,68
5	0,70	0,60	0,65	0,091	0,91
6	0,50	0,60	0,55	0,077	0,77
7	0,80	0,90	0,85	0,119	1,19
8	1,00	1,00	1,00	0,140	1,40

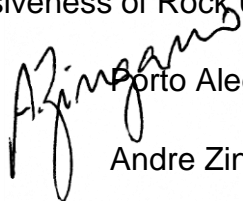
**Tabela 4.** Resultado do ensaio e classificação da rocha ensaiada.

CAI (CERCHAR Abrasivity Index)			
média (X)	desvio padrão (σ)	coeficiente de variação (δ)	Classificação
1,16	0,36	0,31	Abrasividade média

Conforme os resultados apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, conclui-se que a amostra ensaiada apresenta índice de abrasividade CERCHAR **CAI = 1,16**, e segundo os parâmetros descritos nas normas, sua classificação é **abrasividade média**.

## Referências Bibliográficas

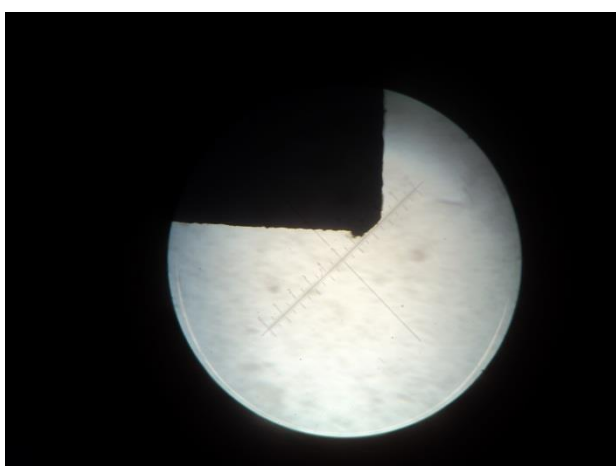
ASTM – D7625-10 - Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using Cerchar Method



Porto Alegre, 08 de junho de 2015.

Andre Zingano

Prof. Dr. Eng. de Minas

**Anexo A****Figura 1.** Máquina CERCHAR.**Figura 2.** Microscópio com lente objetiva 5,6x e lente ocular de 10x.**Figura 3.** Amostras utilizadas no ensaio.**Figura 4.** Ponteiras de aço.**Figura 5.** Ponteira deformada após interação com a rocha