VALENA HENNIES LAUAND

GRAVAÇÃO DE MATERIAIS DE ENGENHARIA
COM JATO D'ÁGUA ABRASIVO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
2010

VALENA HENNIES LAUAND

GRAVAÇÃO DE MATERIAIS DE ENGENHARIA
COM JATO D'ÁGUA ABRASIVO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Stellin Jr.

São Paulo

2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de janeiro de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Lauand, Valena Hennies

**Gravação de materiais de engenharia com jato d'água abrasivo / V.H. Lauand. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
143 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

**1. Rochas ornamentais 2. Corte a frio (Uso; Técnicas)
3. Desgaste abrasivo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Stellin Jr., pela ilimitada paciência.

Ao meu marido, Dr. Carlos Tadeu Lauand, pela ajuda incondicional.

Ao meu pai, Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, pelo estímulo e incansável apoio.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho descreve a utilização do jato d'água abrasivo como ferramenta de gravação em ladrilhos de Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim e em placas de vidro plano comum. São apresentadas as variações de desempenho do processo de gravação, assim como as várias geometrias de ranhuras obtidas com a variação de diversos parâmetros do equipamento. Os resultados da gravação em diversas amostras foram digitalizadas e fotografadas. Além disso apresenta o resultado da gravação, em mármore e vidro de um desenho de geometria complexa. Finalmente discussões e conclusões a respeito dos resultados obtidos são apresentadas.

Palavras-chaves: Engenharia. Engenharia Mineral. Jato de água abrasivo. Gravação de material de engenharia.

ABSTRACT

The current thesis describes the use of abrasive water jet as an etching tool in Branco de Cachoeiro de Itapemirim Marble plate and in float glass plate. Etching process performance variations are introduced as well as different kerf geometries obtained with variation of many processes parameters. The results of the etching in several samples have been photographed and scanned. Furthermore the results of the etching of a complex drawing in marble and glass is shown. Finally conclusions and discussions over the achieved results are described.

Keywords: Engineering. Mineral Engineering. Abrasive water jet. Etching on engenering material.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Jato d'água em alta pressão usado para cortes de diversos materiais, incluindo mármore e aço..	5
Figura 2 –	Já existem máquinas capazes de trabalhar com tolerância de 0,05 mm.	5
Figura 3 –	Jato de água: sem concorrentes no corte de peças que não podem sofrer alterações térmicas.	6
Figura 4 –	Monumento de granito cortado com jato d'água puro.	7
Figura 5 –	Uma replica do famoso “Stonehenge”..	7
Figura 6 –	Relógio solar em granito..	8
Figura 7 –	Remoção de pintura e limpeza de uma chapa metálica.	8
Figura 8 –	Pequenas peças cortadas por AWJ..	9
Figura 9 –	Exposição de trabalhos.	10
Figura 10 –	Peça decorativa de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.	12
Figura 11 –	Peça de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.	12
Figura 12 –	Peça de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.	13
Figura 13 –	Modelo 2652A, OMAX, utilizado nos ensaios..	20
Figura 14 –	Esquema simplificado do modelo 2652A.	20
Figura 15 –	Esquema de um cabeçote de jato d’água abrasivo.	21
Figura 16 –	Nova bomba adquirida em 2007.	23
Figura 17 –	Válvula e novo computador independente.	23

Figura 18 – Novo CAM tridimensional.	24
Figura 19 – Detalhe do CAM tridimensional.	24
Figura 20 – Composição do vidro.	26
Figura 21 – Interior do forno de fundição onde é encontrado o vidro derretido. .	28
Figura 22 – Interior do recipiente de flutuação.	28
Figura 23 – A fita de vidro, ainda quente mas sólida passa no forno de recozimento.	29
Figura 24 – Cortadores transversais sulcam o vidro nos locais onde será cortado. Tanto o corte quanto a estocagem das chapas são realizados automaticamente.	30
Figura 25 – Desenho de uma fábrica de vidro “float”.	30
Figura 26 – Aparência do mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim polido. .	35
Figura 27 – Amostra 1 e Amostra 2 - Vista lateral e vista frontal das amostras com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	39
Figura 28 – Amostra 1 e Amostra 2 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	40
Figura 29 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	41
Figura 30 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	42
Figura 31 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	43
Figura 32 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.	44

Figura 33 – Amostra 1 e Amostra 2 – Vista lateral e vista frontal das amostras com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	45
Figura 34 – Amostra 1 e Amostra 2 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	46
Figura 35 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	47
Figura 36 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	48
Figura 37 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	49
Figura 38 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	50
Figura 39 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	56
Figura 40 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	57
Figura 41 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	58
Figura 42 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	59
Figura 43 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	60
Figura 44 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	61

Figura 45 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	65
Figura 46 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa	66
Figura 47 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	67
Figura 48 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	68
Figura 49 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	69
Figura 50 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.	70
Figura 51 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3 , 10 e 20 mm com velocidade de 18,40 mm/s e pressão de 138 MPa.	73
Figura 52 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3 , 10 e 20 mm com velocidade de 18,40 mm/s e pressão de 138 MPa.. . . .	73
Figura 53 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 15,80 mm/s e pressão de 138 MPa.	74
Figura 54 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 15,80 mm/s e pressão de 138 MPa.	74
Figura 55 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 9,40 mm/s e pressão de 138 MPa.	75

Figura 56 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 9,40 mm/s e pressão de 138 MPa.	75
Figura 57 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 7,10 mm/s e pressão de 138 MPa.	76
Figura 58 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 7,10 mm/s e pressão de 138 MPa.	76
Figura 59 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 5,51 mm/s e pressão de 138 MPa.	77
Figura 60 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 5,50 mm/s e pressão de 138 MPa.	78
Figura 61 – Desenho feito no AutoCAD da máquina de corte por jato de água. .	80
Figura 62 – Detalhe do desenho feito no AutoCAD da máquina de corte por jato de água.. . . .	81
Figura 63 – Detalhe da Figura 62, que corresponde à parte A com espaçamento de 2 mm, e parte B com espaçamento de 2,5 mm.	82
Figura 64 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 1.	84
Figura 65 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 2.	85
Figura 66 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 3.	86
Figura 67 – Detalhe da gravação de ranhuras múltiplas – coluna 1, letra A.. .	87
Figura 68 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 1.. . . .	88
Figura 69 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 2.	89

Figura 70 – Gravação de ranhuras múltiplas – coluna 3.	90
Figura 71 – Detalhe da letra A da coluna 1 dos números 2 a 3 da Figura 68. . . .	92
Figura 72 – Desenho da primeira gravação feita no vidro e no mármore.	94
Figura 73 – Detalhe do desenho da primeira gravação da Figura 76.	95
Figura 74 – Detalhe do desenho da primeira gravação da Figura 76.	96
Figura 75 – Desenho da segunda gravação feita no mármore.	97
Figura 76 – Desenho da segunda gravação feita no vidro.	98
Figura 77 – Gravação final feita no vidro.	100
Figura 78 – Gravação final feita no mármore, com o entupimento do bocal. . .	102
Figura 79 – Gravação final feita no mármore.	103
Figura 80 – Desenho feito em AutoCAD.	105
Figura 81 – Gravação de ranhuras multiplas com fluxo de abrasivo menor. . .	106
Figura 82 – Detalhe da Figura 81, mostrando a gravação de ranhuras multiplas com fluxo de abrasivo menor.	107
Figura 83 – Desenho do corte transversal da ranhura, vista lateral e vista frontal da amostra (altura do bocal de 3 mm, velocidade de 40 mm/s e pressão de 138 MPa).	108
Figura 84 – Gravação realizada com abrasivo mais fino.	110
Figura 85 – Ensaio interrompido pela entupimento do bocal e o aparecimento de trincas.	112
Figura 86 – Ensaio onde ocorreu um erro de gravação.	112
Figura 87 – Gravação realizada com abrasivo mais fino e com uma camada de folha adesiva.	113

Figura 88 – Pedacos de vidro que se quebraram durante o ensaio..	114
Figura 89 – Gravação feito com abrasivo mais fino com qualidade de corte. . .	115
Figura 90 – Gravação executada com abrasivo mais fino e com vidro de 20 mm de espessura.	117
Figura 91 – Gravação executada com abrasivo mais fino e vidro de 20 mm de espessura, mostrando o outro lado do vidro.	118
Figura 92 – Desenho simplificado utilizado para a gravação nas Figura 92, 93 e 95..	120
Figura 93 – Gravação executada com desenho simplificado em vidro de 10 mm de espessura e abrasivo 120#.	121
Figura 94 – A mesma gravação vista pelo outro lado com desenho simplificado em vidro de 10 mm de espessura.	122
Figura 95 – Gravação executada com um desenho simplificado com vidro de 10 mm de espessura e abrasivo 200 #.	123
Figura 96 – Gravação executada com um desenho simplificado com mármore de 10 mm de espessura e abrasivo 120 #	124
Figura 97 – Parte quebrada no transporte (detalhe da Figura 74).	132
Figura 98 – Uma parte da gravação feita da Figura 74, onde são mostradas as trincas e a falta de um pedaço.	132
Figura 99 – Uma parte da gravação (detalhe da Figura 77) onde pode-se ver o aprofundamento das ranhuras..	133
Figura 100 – Detalhe do olho da Figura 93	134
Figura 101 – Detalhe do olho da Figura 94	134
Figura 102 – Detalhe do olho da Figura 96	134
Figura 103 – Comparação das gravações feitas com dois tipos de abrasivo. . . .	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 68 MPa feitas no vidro comum.	51
Tabela 2 –	Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	51
Tabela 3 –	Resultados da largura da ranhura (mm) à 68 MPa feitas no vidro comum.	52
Tabela 4 –	Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	52
Tabela 5 –	Resultados da área da ranhura (mm ²) à 68 MPa feitas no vidro comum.	53
Tabela 6 –	Resultados da área da ranhura (mm ²) à 138 MPa feitas no vidro comum.	53
Tabela 7 –	Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 68 MPa feitas no vidro comum.	54
Tabela 8 –	Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	54
Tabela 9 –	Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	62
Tabela 10 –	Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	62
Tabela 11 –	Resultados da área da ranhura (mm ²) à 138 MPa feitas no vidro comum.	63
Tabela 12 –	Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa feitas no vidro comum.	63

Tabela 13 – Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.	71
Tabela 14 – Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.	71
Tabela 15 – Resultados da área da ranhura (mm ²) à 138 MPa feitos no mármore.	72
Tabela 16 – Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.	72
Tabela 17 – Parâmetros para gravação	126

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 História do Vidro.	13
2.2 História do Vidro no Brasil.	14
3. EQUIPAMENTO	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS.	25
4.1 Materiais	25
4.1.1 <i>Vidro Comum Plano</i>	25
4.1.1.1 <i>Definição</i>	25
4.1.1.2 <i>Composição química</i>	25
4.1.1.3 <i>Processo de fabricação do Vidro “Float”</i>	27
4.1.1.4 <i>Tipos de Vidro</i>	32
4.1.1.5 <i>Classificação do Vidro</i>	32
4.1.1.6 <i>Reciclagem do vidro</i>	33
4.1.2 <i>Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim</i>	34
4.2 Métodos	36
5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO	37
5.1 Ensaios preliminares.	38
5.1.1 <i>Vidro Comum Plano - 1ª série</i>	38
5.1.2 <i>Vidro Comum Plano - 2ª série</i>	55
5.1.3 <i>Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim – 2ª série</i>	64

5.2 Ensaio posteriores.	79
5.2.1 Vidro Plano Comum	83
5.2.2 Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim	87
5.3 Ensaio da gravação final	93
5.3.1 Vidro comum plano	99
5.3.2 Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim	101
5.4 Ensaio Adicionais	104
6. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	125
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS	137
Referências Consultadas	140

1. INTRODUÇÃO

Os jatos d'água abrasivos possuem diversas aplicações em várias áreas da indústria. São utilizados para o corte de praticamente todos os materiais de engenharia, além de limpeza, hidrodemolição e gravação em ladrilhos de rochas ornamentais e vidros, procedimento comumente denominado “etching”, em inglês. O procedimento de gravação pelos modernos sistemas de jatos d'água abrasivos é a tecnologia mais sofisticada, que tenta controlar não só a largura, mas também a profundidade da ranhura do corte aberto. O presente estudo é considerado inédito, e teve início no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na forma de um programa de mestrado, e continuou através do atual programa de doutorado realizado pela autora e sob orientação do Prof. Dr. Antonio Stellin Junior.

A presente tese mostra o resultados experimentais de ensaios preliminares de gravação por jato d'água executados em blocos e ladrilhos de mármore e vidro. O objetivo deste estudo é estudar os parâmetros que influem a aplicação do jato d'água abrasivo para gravação em vidro e mármore. Dentre tais parâmetros, pretende-se identificar quais os de maior impacto na qualidade da gravação. Além disso, será proposto um modelo para auxiliar a utilização do jato d'água abrasivo na gravação destes materiais.

Inicialmente é apresentada uma revisão bibliográfica mostrando os aspectos mais recentes da avançada tecnologia do jato d'água e uma cronologia da indústria do vidro no Brasil. No capítulo seguinte apresenta-se os aspectos tecnológicos e dados relevantes a respeito do equipamento utilizado para a realização dos experimentos. Tal equipamento encontra-se instalado no Módulo de Jato d'Água Abrasivo do Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

O Capítulo 4 descreve os materiais utilizados nos experimentos: o Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim e o vidro comum plano. Aproveita-se este capítulo para descrever o processo de fabricação do vidro plano. Neste mesmo capítulo mostra-se os diversos tipos de vidro existente no mercado. Além disso, fornece-se as características tecnológicas do mármore utilizado.

O Capítulo 5 descreve os ensaios realizados. Os estudos iniciais foram conduzidos para determinação da largura e profundidade da ranhura, bem como do perfil resultante. Os ensaios de ranhuras múltiplas visavam testar o comportamento do vidro e do mármore, sofrendo gravação por jato d'água abrasivo. Largura e profundidade podem ser facilmente controladas, e, se um sofisticado baixo relevo for desejado, este pode ser planejado com boa precisão. Esta possibilidade foi objetivo dos ensaios finais. Este mesmo capítulo apresenta as relações entre a pressão, a velocidade, a altura do bocal e a geometria da ranhura.

Interpretações dos resultados e conclusões podem ser apreciadas respectivamente nos Capítulos 6 e 7 do presente trabalho. Além das referências, foi incluída uma lista de obras as quais recomenda-se a leitura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ideia de corte com água pode ser tão antiga, quanto o provérbio chinês que diz “Água mole em pedra dura tanto bate até que fura”. Na moderna tecnologia do jato d’água, a água pingando é substituída por um jato de água de alta velocidade, na qual a “penetração na rocha” ocorre em segundos.

A moderna tecnologia do jato d’água foi iniciada pelo Dr. Norman C. Franz, da Sociedade Mac Cartney, filial da Ingersoll Rand (fabricante de bombas de alta pressão) em 1968 (FRANZ apud ZENG & KIM, 1995), que foi recompensado com a primeira patente para sistemas de corte por jato d’água de elevada pressão. Baseado nesta ideia, o primeiro sistema de corte de jato de água comercial foi desenvolvido para cortar tubos de papel laminado em 1971.

No ano seguinte, o primeiro simpósio de tecnologia de corte por jatos de água teve lugar na Inglaterra para reunir os principais pesquisadores e fabricantes para que se discutisse o estado da arte e os projetos futuros da tecnologia do jato de água.

Desde então, a tecnologia do jato de água assistiu a um próspero crescimento. Em 1983, a ideia de introduzir abrasivo no jato de água foi patenteada e foi imediatamente seguida pelo desenvolvimento do primeiro sistema de jato de água abrasivo, que normalmente é designado pelas três primeiras letras em inglês de “abrasive water jet” (AWJ), ou jato d’água abrasivo.

Como as capacidades dos AWJ foram aprimoradas, surgiram os processos de conformação mais precisos. Um recente serviço para aplicação industrial da tecnologia do jato de água (KLAVUHN & BAKER, 1989) indica que a prioridade maior é estabelecer padrões de desempenho e uma completa base de dados dos cortes.

Os modernos sistemas de jatos abrasivos de ultra-alta pressão podem ser utilizados para corte, polimento, gravação, limpeza, torneamento e uma série de procedimentos de manufatura dos mais diversos (HASHISH, 1988).

Este mesmo autor foi pioneiro na gravação de metais com o uso de jato abrasivo (HASHISH, 1987 e HASHISH, 1994a e 1994b).

Um programa de doutorado dedicado a gravação em ferro fundido procurou estabelecer um modelo matemático da ranhura obtida (LAURINAT et al, 1993).

Holmqvist e Öjmertz (1997) sugeriram desenvolvimentos com o uso de bocais de forma peculiar e jato pulsante para gravação.

Por outro lado, outros autores dedicaram-se a pesquisas com materiais diversos, e às vezes de natureza mais frágil, como a cerâmica. Zeng e Munoz (1997) e Hennies et al (2002) verificaram a possibilidade de corte e gravação de materiais friáveis. Lauand et al (2002) mostram os resultados da utilização de jato d'água abrasivo no corte de ladrilhos cerâmicos. Freist (1989) verifica a utilização de jato d'água abrasivo no corte de ladrilhos cerâmicos.

O AWJ também encontra aplicação no corte de chapas de polipropileno (HENNIES et al., 2004), e no corte de rochas ornamentais (LAUAND et al, 2000 e LAUAND et al, 2001).

Como na literatura não existe referência sobre a gravação de rochas e de vidro, é apropriado realizar investigações preliminares em um programa de doutorado.

A Figura 1 mostra a fotografia de cabeçote de jato d'água abrasivo devidamente posicionado para efetuar o corte ou gravação de uma chapa de metal. Na Figura 2 pode-se visualizar uma máquina de múltiplos cabeçotes executando cortes de geometria complexa em várias chapas metálicas.

Figura 1 – Jato d'água em alta pressão usado para cortes de diversos materiais, incluindo mármore e aços.

Fonte: CARDOSO (2004)

Figura 2 – Já existem máquinas capazes de trabalhar com tolerância de 0,05 mm.

Fonte: CARDOSO (2004)

Na indústria aeronáutica, por exemplo, substitui o laser no corte de chapas de titânio, com a vantagem de não elevar a temperatura do metal durante o processo (Figura 3). Na indústria automobilística é largamente utilizada para o corte de painéis de plástico. No setor de rochas ornamentais, o equipamento pode ser utilizado tanto para o corte de chapas ou ladrilhos, como para o corte de blocos em pedreiras, como tecnologia de lavra (LAUAND, 2005).

Figura 3 – Jato de água: sem concorrentes no corte de peças que não podem sofrer alterações térmicas

Fonte: CARDOSO (2004)

O jato de água puro, ou seja, sem abrasivo é utilizado para o corte de granito. A Figura 4 mostra um monumento de granito cortado com jato d'água puro na Universidade de Missouri – Rolla, no estado de Missouri, EUA. No campus desta mesma universidade encontra-se uma replica do famoso “Stonehenge”¹ também cortado por jato d'água puro (Figura 5). Na Figura 6 pode-se visualizar um detalhe desta réplica: trata-se do relógio solar em granito gravado por jato d' água puro.

¹ Stonehenge é um monumento megalítico da Idade do Bronze. Localiza-se na planície de Salisbury, próximo a Amesbury, no condado de Wiltshire, no Sul da Inglaterra.

Figura 4 – Monumento de granito cortado com jato d'água puro.

Figura 5 – Uma replica do famoso “Stonehenge”.

Figura 6 – Relógio solar em granito.

Na Figura 7 pode-se visualizar o jato d'água sendo utilizado para remoção de pintura e limpeza de uma chapa metálica. Shipway (2008) explica em detalhes os mecanismos deste processo.

Figura 7 – Remoção de pintura e limpeza de uma chapa metálica.

A Figura 8 mostra que pode-se utilizar o jato d'água abrasivo para o corte de peças de pequenas dimensões (Quadrado laranja mede 21 x 30 cm).

Figura 8 – Pequenas peças cortadas por AWJ.

Na Figura 9 nota-se uma exposição de trabalhos com várias peças de diferentes materiais, inclusive vidro, cortados por AWJ pelos alunos da Universidade de Missouri — Rolla. Isto nos leva há uma reflexão se o que foi produzido pode ser considerado como arte.

Todas as culturas têm produzido arte ao longo da história. O impulso para criar, para a realização de forma simples ou de forma complexas — para reconhecer ou para gerar a arte — é universal e perpétua.

Cada obra de arte tem dois aspectos: uma é a experiência atual que reverte a um balanço do passado, e a outra é o valor, a preservação, e que são estudadas para ambas as

Figura 9 – Exposição de trabalhos.

identidades. Como experiências atuais, trabalhos artísticos permitem as pessoas os prazeres, as tensões, os dramas e, em última instância a satisfação aos sentidos da forma pura — nas artes visuais as relações entre cores, linhas, massas no espaço.

O significado da palavra arte, derivado do latim *Ars*, que significa "habilidade", mudou ao longo da história. Na Europa medieval, a proficiência em "artes liberais", foi o objetivo a ser alcançado por uma pessoa educada. Apenas no século 19 apareceu a palavra que designou a pintura, o desenho, a escultura, as artes gráficas e as artes decorativas. Apareceu uma distinção entre o artista e o artesão, este último denotando um trabalhador qualificado manual.

Embora as artes hoje possam ser consideradas como sendo compreendidas pelo musical e pelo verbal bem como pelo visual, arte ou belas artes significa as artes

visuais que são listadas como: PINTURA, ESCULTURA, ARQUITETURA e por extensão DESENHO, ARTE DECORATIVA e FOTOGRAFIA..

Acredita-se que o jato d'água pode ser utilizado como uma ferramenta artística, criando verdadeiras obras de arte em diversos materiais. Assim utilizando algum material de engenharia, que é gravado ou cortado por um sofisticado sistema de jato d'água pode ser considerado com uma arte, que é alguma maneira interligada a outras artes visuais, como arquitetura e artes decorativas. Além disso, o vidro é diferente da rocha (mármore) pois ele é transparente, assim o vidro pode ser gravado com um jato d'água abrasivo em ambas as faces, dando a este procedimento um efeito especial para o trabalho.

Assim como o pincel é a ferramenta do pintor, o cinzel é a ferramenta do escultor, pode-se considerar o AWJ como a nova ferramenta dos artistas. Ferramenta está que pode ser usada para esculpir, cortar, desenhar e gravar e porque não dizer pintar, substituindo a água por tinta.

Segundo Cuttler (2007), a técnica de jato d'água abrasivo tornou-se uma ferramenta criativa no corte de vidro, contribuindo para ampliar os parâmetros do material e do processo no campo da arte, design e arquitetura. Cuttler mostrou a necessidade da aplicação de jato de água no desenvolvimento do processo do corte de vidro e como ele beneficiou o artista com o desenvolvimento do corte de vidro. “Na produção das obras, o sucesso aconteceu basicamente devido ao roteiro inicial usado na fabricação das peças. É vital a compreensão da capacidade da máquina e as características dos diferente tipos de vidros a serem cortados. Cada uma das obras de vidro tem propriedades diferentes e em cada aplicação, há uma necessidade de manter a solidez e a estabilidade da estrutura de vidro” (CUTTLER, 2007). As Figuras 10, 11 e 12 mostram algumas dessas obras.

Figura 10 – Peça decorativa de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.

Fonte: CUTTLER, 2007.

Figura 11 – Peça de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.

Fonte: CUTTLER, 2007.

Figura 12 – Peça de vidro, cortada por jato d'água abrasivo.

Fonte: CUTTLER, 2007.

2.1 História do Vidro

O surgimento do vidro é incerto, mas registros do historiador romano Plínio atribuem esta descoberta a navegadores fenícios, ao acenderem fogueiras nas areias do rio Belo. O que se sabe com certeza é que sírios, fenícios e babilônios já utilizavam vidro desde 7.000 a.C., mas foi no Egito antigo, por volta de 1.500 a.C., que o vidro começou a ser utilizado como adorno pessoal, joia e embalagem para cosméticos. Algumas dessas peças foram encontradas, em perfeito estado de conservação, no sarcófago de Tutancamon. Por ser naquela época a civilização dominante, os egípcios acabaram difundindo o vidro e a sua técnica de fabricação para outros povos (ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO, 2007).

A revolução na produção aconteceu em 100 a.C., quando os fenícios inventaram o tubo de sopro, permitindo a fabricação de vários objetos. Na mesma época, os romanos massificaram o uso do vidro, com a produção de objetos de uso cotidiano e a sua utilização em janelas. Com o declínio do Império Romano, o vidro passou por uma fase de pouco desenvolvimento, mas voltou à evidência no começo da Idade Média, quando

as igrejas católicas começaram a usar vitrais coloridos. Em seguida, Veneza assumiu o papel de centro vidreiro do mundo ocidental. Com o propósito de preservar as fórmulas secretas, transmitidas de pai para filho, em 1291 toda a indústria vidreira foi transferida de Veneza para a cidade de Murano.

Em 1650 houve o aperfeiçoamento da rolha, aumentando decisivamente o uso do vidro como recipiente para acondicionar bebidas. Com a Revolução Industrial, o vidro assumiu um papel definitivo na história da humanidade. Basta olhar à volta e será possível ver o vidro presente em janelas, pára-brisas de automóveis, telas de computadores e televisões, copos, entre incontáveis outras aplicações. O modo de vida do homem moderno seria praticamente impossível sem o vidro.

2.2 História do Vidro no Brasil

A história da indústria do vidro no Brasil iniciou-se com as invasões holandesas (1624), em Olinda e Recife, onde a primeira oficina de vidro foi montada por quatro artesões que acompanharam o príncipe Maurício de Nassau. A oficina fabricava vidros para janelas, copos e frascos (ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO, 2007).

Com a saída dos holandeses a fábrica fechou. O Alvará de 1785 de D. Maria I, determinou a extinção de todas as manufaturas “em qualquer parte onde se acharem, nos domínios do Brasil”. Todo o vidro passou a ser importado de Portugal e posteriormente das colônias inglesas.

O Alvará de 1º de abril de 1808, do príncipe regente D. João VI, inspirado por José da Silva Lisboa, “desejando promover e adiantar a riqueza nacional, e sendo um dos mananciais a manufatura e a indústria”, resolveu abolir e revogar qualquer proibição que houvesse a esse respeito do Brasil.

O vidro voltou a entrar no mapa econômico do país a partir de 1810, quando em 12 de janeiro daquele ano, o português Francisco Ignácio da Siqueira Nobre recebeu carta régia autorizando a instalação de uma indústria de vidro no Brasil. A fábrica, instalada na Bahia, produzia vidros lisos, de cristal branco, frascos, garrações e garrafas. Ela entrou em operação em 1812. Em 1825 fechou em função das grandes dificuldades financeiras, burocráticas, trabalhistas.

Em 1839, Folco fundou no Rio de Janeiro a fábrica Nacional de Vidros São Roque, com 43 operários, com fornos à cadinhos e processo inteiramente manual.

Em 1878, Francisco Antônio Esberard fundou a Fábrica de Vidros e Cristais do Brasil, em São Cristóvão, estado do Rio de Janeiro. A fábrica trabalhava com sete fornos e com máquinas, a vapor e elétricas. Fabricava vidros para lampiões, janelas, copos e artigos de mesa. Ocupava 600 pessoas entre operários e artistas do vidro. A fábrica esteve ativa até 1940.

Outra fábrica de destacada presença foi a Fratelli Vita, da Bahia, fundada em 1902, que produziu garrafas para sodas e refrigerantes, e cristais de qualidade.

Em 1875, o alemão Conrado Sorgenicht estabeleceu em São Paulo uma oficina para fabricação de vitrais, os primeiros fabricados no Brasil.

Em 1922, o imigrante italiano César Alexandre Formenti abriu um atelier no Rio de Janeiro, criando vitrais para igrejas da cidade.

Até o século XX a produção de vidro era essencialmente artesanal, utilizando os processos de sopro e de prensagem, sendo as peças produzidas uma a uma.

Foi a partir do início do século XX que a indústria do vidro se desenvolveu com a introdução de fornos contínuos e máquinas semi ou totalmente automática para produções em massa.

Um fato marcante para o setor vidreiro brasileiro foi o surgimento, a partir do final do século XIX, de importantes empresas que ainda hoje dominam o mercado. A seguir será abordada a constituição dos principais fabricantes de vidro no país.

Em 1895, foi fundada em São Paulo a Vidraria Santa Marina, hoje um dos grandes grupos industriais do país. Em 1900, a fábrica já produzia 20 mil garrafas de vidro verde por dia. Em 1903, a Santa Marina transformou-se em sociedade anônima e cinco anos mais tarde produzia um milhão de garrafas mensalmente, 2 m² de vidro para vidraça em 24 horas e empregava 650 operários. Alta produtividade para uma fábrica que só em 1921 instalaria máquinas automáticas com capacidade diária de 460 mil garrafas.

A partir de então, a Santa Marina procurou diversificar suas atividades, através de associações e expansões. Em 1941 associou-se à Companhia Vidreira Nacional (Covibra) e constituiu a Companhia Paulista de Vidro Plano. Esta nova empresa, com participação da Pittsburg Plate Glass, introduziu no Brasil o processo Pittsburg de fabricação do vidro plano. Em 1944, a Santa Marina uniu-se à americana Corning Glass Works, cujo laboratório era considerado um dos mais avançados do mundo, começou a produzir, em 1951, os vidros Pyrex, patente da empresa americana.

O acelerado processo de industrialização do país na década de 1950 atraiu investimentos do exterior para o setor vidreiro. Em 1960, o grupo Santa Marina se associou à indústria francesa, e o grupo Saint-Gobain passou a ser seu acionista majoritário.

A origem da Companhia Industrial São Paulo e Rio (Cisper) ocorreu a partir de uma pequena fábrica chamada Carmita, fundada em 1908 no Rio de Janeiro, com tecnologia americana e máquinas automáticas da empresa Owens, que produzia garrafas de cervejas em série. Em 1916, a fábrica Carmita pediu falência, sendo adquirida pelos engenheiros Olavo Egydio de Souza Aranha Jr. e Alberto Monteiro de Carvalho e Silva, com a razão social Companhia Industrial São Paulo e Rio – Cisper. Nos anos seguintes, a Cisper seria a única a produzir garrafas no Brasil, com máquinas automáticas.

A Cisper tornou-se conhecida em todo o mercado brasileiro como a indústria mais avançada na produção de embalagens de vidro. Em 1962, a Owens Illinois adquiriu o controle acionário da Cisper, operação que ofereceu à empresa acesso às mais avançadas tecnologias de produção do vidro e permitiu ao Grupo Monteiro Aranha realizar maior diversificação dos seus investimentos.

O empreendedor Nadir Figueiredo passou de importador a produtor de vidro em 1935, ao adquirir duas fábricas em São Paulo. Atento aos progressos da tecnologia na área do vidro, após a Segunda Guerra Mundial, foi aos EUA estudar novos processo de produção, que adotou em sua nova fábrica, inteiramente automática. Nesta fábrica conseguia produzir 72 mil copos por dia, o que representou um notável avanço para a indústria brasileira da época.

A passagem de importador para produtor tornou-se comum entre os empresários do vidro. É o caso da M. Agostini, criada em 1938 no Rio de Janeiro para importar lampiões da marca Aladdin; passou a produzi-los em 1953. Em 1964, a M. Agostini começou a fabricar garrafas térmicas no Brasil, com assessoria técnica da Aladdin, usando o vidro borossilicato. Desde 1974 as garrafas térmicas da M. Agostini são produzidas em máquinas automáticas Olivoto, mas o sistema de fabricação ainda é o

mesmo: duas ampolas de vidro separadas por uma amarra de vácuo que fica em contato com superfícies espelhadas.

A Corning do Brasil estabeleceu-se em São Paulo em 1964, inicialmente fabricando bulbos para tubos de televisão e mais tarde lentes oftálmicas, que exportou com sucesso.

Da Grã-Bretanha veio o grupo Pilkington, que em 1978 adquiriu a Providro, fábrica de vidro laminado, e a Blindex, que opera no mercado de vidros para veículos e automotores.

Fundada em 1952, a Wheaton do Brasil se caracteriza, como a matriz nos EUA, pela fabricação em alta velocidade de embalagens para a indústria farmacêutica e de cosméticos.

A Vidrofarma, do Rio de Janeiro, associada ao grupo alemão Schott, fabrica tubos de vidros neutros utilizado na produção de frascos e aparelhos de laboratórios, e fornece vidros alcalinos usados nas lâmpadas fluorescentes.

Em 1982, a indústria francesa Saint-Gobain e a inglesa Pilkington uniram suas forças para construir a primeira fábrica de vidro “Float”² do Brasil, a COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL (CEBRACE), na região do Vale do Paraíba, no estado de São Paulo. A CEBRACE reúne em seus processos de fabricação as melhores experiências e a tecnologia de ambas empresas.

A primeira linha foi construída em Jacareí em 1982, e foi visitada pela autora. A segunda linha foi construída em Caçapava, em 1989, e a terceira em Jacareí, em 1996. Juntas, as três unidades produzem até 1.800 toneladas de vidro por dia. Em 2004 a CEBRACE inaugurou sua quarta linha em Barra Velha, estado de Santa Catarina com

2 Processo de fabricação de vidro plano pelo método de flutuação. Tal processo está descrito no capítulo Materiais e Métodos.

equipamentos de última geração. Trata-se de uma das maiores e mais modernas fábricas de vidros planos do mundo.

Líder nos mercados onde atua, a multinacional inglesa Pilkington é detentora da marca Blindex, atendendo aos segmentos automobilístico, de construção civil, de decoração e de vidros técnicos. No centro do negócio da empresa está o vidro “Float”¹, inventado pela Pilkington em 1952.

No Brasil, a Saint-Gobain está presente desde 1937 e possui marcas tradicionais e conhecidas como: Saint-Gobain Glass, Santa Marina-Vitrage, Brasilit, Quartzolit, Marinex, Duralex, Sekurit, Telhanorte, Vitrage, entre outras.

A indústria do vidro transformou-se, diversificou-se e chegou, a uma fase de maturidade. Hoje, mais de 200 empresas produzem vidro no Brasil, 24 das quais integralmente automatizadas, atendendo aos mercados interno e externo, competindo em condições de igualdade com empresas do exterior. Como em outros setores da indústria, o crescimento das exportações também se faz sentir na áreas do vidro, com o mesmo efeito de sustentação de atividade em período de dificuldade econômicas.

3. EQUIPAMENTO

Um moderno sistema de jato d'água abrasivo foi importado, em 1999, e colocado em operação em janeiro de 2000, com suporte financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. O sistema está instalado e em operação no Módulo de Jato d'Água Abrasivo do Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. O modelo é o 2652A de marca OMAX, mostrado na Figura 13. Lauand (2001) descreve detalhadamente o equipamento e seu princípio de funcionamento. Na Figura 14 é mostrado um esquema simplificado.

Figura 13 – Modelo 2652A, OMAX, utilizado nos ensaios.

Figura 14 – Esquema simplificado do modelo 2652A.

Na Figura 15 pode-se visualizar o esquema de funcionamento do cabeçote de jato d'água abrasivo utilizado no equipamento.

Figura 15 – Esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo.

Este sistema, apesar de ser automatizado, possuía uma bomba de 20 hp. O controle da bomba era realizado pelo próprio computador existente no sistema. A pressão de trabalho máxima de operação do sistema era então de 360 MPa (52.000 psi) .

A regulagem da pressão podia ser feita manualmente através de uma válvula de desvio de pressão. Assim, neste sistema era possível regular o sistema em pressões bastante baixas tais como 35 MPa, 68 MPa ou 103 MPa.

Após mais de 5 anos de operação do sistema para a realização de ensaios dos mais diversos, em 2006 foi solicitada ao fabricante uma manutenção mais rigorosa. Constatou-se que o tipo de bomba utilizado no sistema saiu de linha e não era mais fabricado. Chegou-se então à conclusão que era justificável atualizar o sistema no seu todo, para que o mesmo não caísse em total obsolescência.

A FAPESP, entendendo o problema, de pronto nos atendeu novamente, e liberou recursos para este anseio de atualização do sistema, inclusive com a compra de nova bomba de ultra-alta pressão.

Assim, durante o ano de 2007, uma nova bomba foi adquirida para gerar a ultra-alta pressão do sistema. Esta nova bomba, com potência de 30 hp, é gerenciada por um computador independente (Figuras 16 e 17). A nova automatização feita no sistema permite que se utilizem apenas pressões de trabalho acima de 124 MPa (18.000 psi), sendo, de certo modo, um inconveniente, como no caso de se desejar fazer gravações.

Por outro lado, uma série de inovações foi introduzida no sistema, entre os quais, o CAM¹ tridimensional, é o mais destacado. Assim, a mesa XY, adquiriu um terceiro eixo Z ortogonal, com um deslocamento possível de 30 cm. A regulação da distância do bocal até a peça alvo, que outrora era feita manualmente, passou a ser feita automaticamente, sendo que o usuário determina este afastamento em milímetros (Figuras 18 e 19).

1 Computer Aided Manufacturing (CAM), ou Manufatura Auxiliada por Computador.

Figura 16 – Nova bomba adquirida em 2007.

Figura 17 – Válvula e novo computador independente.

Figura 18 – Novo CAM tridimensional.

Figura 19 – Detalhe do CAM tridimensional.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para realização dos ensaios foram selecionados dois tipo de materias diferentes: mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim e vidro comum plano. As principais características tecnológicas do vidro comum plano e da rocha ornamental (mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim) estão descritas a seguir.

4.1.1 *Vidro Comum Plano*

4.1.1.1 *Definição*

O vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, obtida através do resfriamento de uma massa em fusão. Suas principais qualidades são a transparência e a dureza (MAIA, 2003).

O vidro distingue-se de outros materiais por várias características: não é poroso nem absorvente, é ótimo isolador, possui baixo índice de dilatação e condutividade térmica, suporta pressões de 5.800 a 10.800 kg/cm² (MAIA, 2003).

4.1.1.2 *Composição química*

Os seguintes substâncias químicas participam da composição do vidro (Figura 20) (COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL, 2007):

- 72 % Sílica (SiO_2) – Matéria prima básica (areia) com função vitrificante.
- 14% Sódio (Na_2SO_4) – Aumenta a resistência mecânica.

- 9% Cálcio (CaO) – Proporciona estabilidade ao vidro contra ataques de agentes atmosféricos.
- 4% Magnésio (MgO) – Garante resistência ao vidro para suportar mudanças bruscas de temperatura e aumenta a resistência mecânica.
- 0,7% Alumina (Al₂O₃) – Aumenta a resistência mecânica.
- 0,3% Potássio (K₂O) – Melhora o processo de fundição e baixa o risco de cristalização e cores mais brilhantes.

Figura 20 – Composição do vidro.

A sucata de vidro, limpa e selecionada, é usada para auxiliar a fusão (COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL, 2007).

Na composição de vidros coloridos entram produtos químicos diversos, de acordo com a cor desejada. A presença de óxido de ferro é responsável pela cor ligeiramente esverdeada do vidro comum. Para se obter um produto incolor é necessário adicionar

pequenas quantidades de selênio e óxido de cobalto, que atuam como descolorantes (COMO, 1979).

Os vidros coloridos são produzidos acrescentando-se à composição corantes como o Selênio (Se) (vidro vermelho), Óxido de Ferro (Fe_2O_3) (vidro verde), e Óxido de Cobalto (Co_3O_4) (vidro azul), para atingir as diferentes cores (COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL, 2007).

4.1.1.3 Processo de fabricação do Vidro “Float”

O processo “float” foi inventado em 1959, por Alastair Pilkington. A ideia surgiu quando Pilkinton, ajudando sua esposa a lavar a louça, notou que porções de óleo não se misturavam com a água na pia, permanecendo na forma de lâminas sobre esta. A partir daí, ele procurou um metal que fizesse o mesmo papel da água, onde o óleo seria o vidro. Pesquisando os elementos existentes, ele chegou ao estanho, pois este é bem mais denso que o vidro e continua líquido, não se misturando com ele nas temperaturas em que se dá o enrijecimento do vidro (de 1100°C a 600°C).

O processo, que originalmente produzia somente vidros com espessura de 6 mm, produz atualmente vidros que variam entre 1,8 e 19 mm. A matéria-prima misturada é composta de 70% de material virgem e 30% de vidro moído. O material é levado por esteiras até o forno, onde é fundido (Figura 21). O vidro fundido, a uma temperatura aproximada de 1000 °C, é continuamente derramado num tanque de estanho liquefeito, quimicamente controlado. A massa fundida flutua no estanho, espalhando-se uniformemente (Figura 22). A espessura é controlada pela velocidade da chapa de vidro e por “top-rolls”¹ que puxam ou empurram a chapa de vidro para espessura necessária. Enquanto avança através do estanho derretido, a fita de vidro é resfriado a

¹ Rodas dentadas que pinçam o vidro pelas bordas e que têm rotação e ângulos variáveis e regulados por motores

Figura 21 – Interior do forno de fundição onde é encontrado o vidro derretido.

Fonte: COMO (1979).

Figura 22 – Interior do recipiente de flutuação.

Fonte: COMO (1979).

uma temperatura de 600°C, para que sua superfície endureça o suficiente para que ela possa passar através do forno de recozimento sem que os cilindros marquem sua superfície inferior (Figura 23). O vidro se solidifica à medida que continua avançando. Após o recozimento (resfriamento controlado), o processo termina com o vidro apresentando superfícies polidas e paralelas. Este processo é chamado de vidro “float”. Após passar pelo forno de recozimento, o vidro segue por meio de cilindros até os cortadores transversais que sulcam o vidro nos locais onde será cortado com uma simples pressão (Figura 24). Na Figura 25 pode-se ver uma esquema de uma fábrica de vidro “float”.

Figura 23 – A fita de vidro, ainda quente mas sólida passa no forno de recozimento.

Fonte: COMO (1979).

Figura 24 – Cortadores transversais sulcam o vidro nos locais onde será cortado. Tanto o corte quanto a estocagem das chapas são realizados automaticamente.

Fonte: COMO (1979).

Figura 25 – Desenho de uma fábrica de vidro “float”.

Fonte: PILKINGTON NO BRASIL (2009)

Ao despejar um líquido menos denso sobre outro mais denso, sendo ambos imiscíveis (como água e óleo), o menos denso vai formar uma lâmina sobre o mais denso, resultando uma espessura dita "de equilíbrio", que depende de alguns fatores. Quando

se despeja o vidro fundido sobre o estanho, a tendência é de se formar uma lâmina de 5 a 6 mm de espessura. O banho de estanho deve ser longo o suficiente para que dê tempo para o vidro esfriar dos 1100°C, na sua entrada, até 600°C, na saída, quando estará rígido.

A vazão de vidro é determinada, na saída do forno de fusão, por um registro que regula o fluxo (chamado de "tweel"). A espessura do vidro é determinada pelo balanço entre as tensões superficiais, a força de gravidade e a velocidade de extração. Aumentando-se a velocidade, a fita afina; diminuindo, ela engrossa. O controle da temperatura de saída é muito importante, pois se estiver muito quente, o vidro ficará marcado pelos rolos que o conduzem pelo forno de recozimento; se estiver muito frio, poderá se romper. A velocidade de extração do vidro é justamente proporcionada pela tração destes rolos na fita contínua de vidro saindo do float e entrando no forno de recozimento.

Além dos parâmetros acima, a espessura é controlada pelo uso de até 8 “top-rolls”.

Para a produção de vidros de 5 a 6 mm de espessura, os “top-rolls” ficam paralelos ao fluxo de vidro e o controle da espessura se faz pela velocidade de extração.

Para vidros mais finos que a espessura de equilíbrio, eles são dispostos para formar ângulos divergentes, tendendo a esticar a lâmina, em conjunto com uma maior velocidade de extração.

Para vidros mais grossos, eles são dispostos em ângulos convergentes, tendendo a empurrar o vidro da borda para o centro, em combinação com uma menor velocidade de extração. O estanho, embora sendo o melhor elemento para se utilizar no processo, tem um sério inconveniente: ele se oxida, nas temperaturas exigidas pelo vidro. Sendo assim, é necessário que todo o banho de estanho fique enclausurado dentro de uma grande caixa, onde se injeta nitrogênio. Dentro desta caixa, há uma série de resistências

elétricas que garantem um perfil térmico conveniente desde a entrada até a saída do vidro.

O processo do vidro “float” foi desenvolvido pela Pilkington em 1952 e é padrão mundial para a fabricação de vidro plano de alta qualidade.

4.1.1.4 Tipos de Vidro

Segundo sua composição, os vidros podem ser classificados em três tipos distintos, a saber:

Sodo-Cálcico. São vidros cuja a composição contém soda e cálcio, e são utilizados em embalagens em geral, como garrafas, potes e frascos. Incluem-se os vidros planos, utilizados pela indústria automobilística, construção civil e eletrodomésticos.

Boro-Silicato. São utilizados em utensílios domésticos resistentes a choque térmico

Chumbo. Pelo fato de o chumbo conferir mais brilho ao vidro, são utilizados em copos, taças, cálices, ornamentos e peças artesanais.

4.1.1.5 Classificação do Vidro

Os vidros, de acordo com sua utilização, podem ser classificados em:

Vidros para embalagem. Potes para alimentos, frascos e garrafas para bebidas, produtos farmacêuticos, higiene pessoal e mais incontáveis outras aplicações: a utilização do vidro para embalagens é uma das mais antigas e frequentes aplicações para o vidro. Por ordem de consumo, a maior utilização é a do setor de bebidas,

principalmente com cervejas, seguida pela indústria de alimentos e, logo após, produtos não alimentícios, sobretudo farmacêuticos e cosméticos.

Vidros domésticos. São aqueles usados em utensílios como louças de mesa, copos, xícaras e objetos de decoração.

Vidros planos. Fabricados em chapas, são consumidos principalmente pela construção civil, seguida pela indústria automobilística e moveleira, depois na produção de espelhos e um pequeno percentual para outras aplicações. Além dos vidros translúcidos, um outro tipo de vidro plano, chamado impresso ou fantasia, atende, em menor quantidade, o mercado da construção civil.

Vidros especiais. São vidros com composições e características especiais, adequadas a necessidades muito específicas de utilização, como os usados na produção de cinescópios para monitores de televisão e computadores, bulbos de lâmpadas, garrafas térmicas, fibras óticas, blocos oftálmicos, blocos isoladores e até tijolos de vidro.

4.1.1.6 *Reciclagem do vidro*

O vidro é o único material que possui três importantes qualidades que o diferenciam de outros materiais utilizados em embalagens (ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO, 2007). São estas:

Reciclável: O vidro é infinitamente reciclável. Um recipiente de vidro reciclado possui as mesmas qualidades de um fabricado com matérias-primas virgens, independentemente do número de vezes que o material for utilizado. É a única embalagem amiga da natureza.

Retornável: As embalagens como garrafas de refrigerantes e cervejas podem ser reaproveitadas diversas vezes, sem que haja problemas de deformação ou absorção de sabores quando forem lavadas em temperaturas elevadas ou com detergentes adequados.

Reutilizável: Recipientes de vidro acabam sendo reutilizados de maneira diferente daquela em que foram produzidos. Podem ser utilizados para armazenar alimentos ou até como objetos de decoração.

As sobras de vidro, como cacos, podem ser reaproveitadas na produção de um novo vidro reduzindo-se a necessidade de extração de matérias-primas da natureza e minimizando-se o consumo de energia elétrica e queima de combustíveis.

No caso do vidro, mesmo quando em aterro, não provoca poluição já que é composto basicamente por areia e outras matérias-primas naturais.

4.1.2 Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim

O estado do Espírito Santo é um grande produtor e exportador de mármore e também responde por 75% da produção de mármore do país. É possível encontrar mármore nas cores rosa, branco, verde, pinta verde, chocorosa (mistura de chocolate com rosa), marrom e o branco absoluto, que é a variedade com a cor branca mais pura que existe. (REVISTA INFOROCHAS, 2009)

A reserva de mármore do Espírito Santo possui 40 quilômetros de extensão por oito de largura e está localizada entre Cachoeiro de Itapemirim, Vargem Alta e Castelo. Ela produz cerca de 6 mil metros cúbicos por mês de rochas para ornamentação e 300 mil toneladas de pó. As rochas de mármore são usadas na construção civil, indústria funerária e ornamentação. Já o pó é usado na produção de tintas, cosméticos, creme dental, medicamentos e, na siderurgia, é usado para dar liga ao aço.

A extração do primeiro bloco de mármore aconteceu há 50 anos, no dia 7 de abril de 1957, no Espírito Santo na localidade de Prosperidade, município de Vargem Alta - na época pertencente à Cachoeiro de Itapemirim. A pedra foi extraída na fazenda do produtor rural Horácio Scaramussa, filho de imigrantes italianos, depois que seu sobrinho Oge Dias de Oliveira, ao ver as montanhas do mineral, resolveu levar amostras para análise no Rio de Janeiro.

O município que mais se destaca é o de Cachoeiro de Itapemirim. Ele tem a maior reserva de mármore e o maior parque industrial de rochas ornamentais do país. Também tem lavras de mármore, empresas para beneficiamento primário (serragem) e secundário (polimento e produtos acabados), entre outros. A maioria dos teares (conjunto onde se faz a serragem do bloco em chapas) está localizada em Cachoeiro de Itapemirim.

A extração do Mármore de Cachoeiro de Itapemirim é feito por blocos cortados com fio diamantado. Os blocos são, então, levados ao teares onde são cortados em chapas, as quais polidas e cortados em ladrilhos.

O mármore selecionado para o teste em laboratório foi o mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim (Figura 26), também conhecido como mármore Branco Clássico. A jazida está localizada a 200 km da cidade de Vitória, no município de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo. São comercializadas chapas serradas, chapas polidas, ladrilhos rústicos e ladrilhos serrados.

Figura 26 – Aparência do mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim polido.

O mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim é um mármore dolomítico branco. Suas características tecnológicas são as seguintes (Caruso, 1990): classificação

petrográfica — calcita-dolomita mármore; composição mineralógica — dolomita (80%); tremolita (10%); calcita (5%); olivina (< 5%); serpentinita, clorita magnesiana (< 5%); utilização recomendada — revestimentos interiores e pavimentos de baixo tráfego; massa específica Aparente Seca — 2.850 kg/m^3 ; porosidade aparente — 0,26%; absorção de água — 0,09%; desgaste amsler — 2,49 mm/1.000 m; compressão uniaxial — 99,85 MPa; flexão — 6,20 MPa; coeficiente de dilatação térmica linear — $8,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm/m}^\circ\text{C}$.

4.2 Métodos

Para os ensaios preliminares com vidro foram utilizados dois prismas retangulares, um medindo 100 mm x 155 mm x 20 mm e outro medindo 225 mm x 210 mm x 20 mm, e chapas de 300 x 400 mm, com 10 mm de espessura. Para o mármore também foram utilizadas chapas de 300 x 400 mm, com 20 mm de espessura. Em virtude da atualização do sistema ter ocorrido em meio aos ensaios, há duas séries de ensaios preliminares. A primeira série refere-se aos ensaios com baixas pressões da bomba original. Após a atualização o sistema não permitiu mais ensaios com uma pressão inferior a 124 MPa (18000 psi), sendo necessário uma nova série de ensaios preliminares (2ª série) com uma pressão em torno de 138 MPa (20.000 psi).

Para os ensaios de ranhuras múltiplas e ensaios de gravação final, foram adquiridos ladrilhos de 400 mm por 300 mm com espessura de 10 mm para o vidro, e 400 mm por 300 mm com espessura de 20 mm para o mármore.

Depois de executados os ensaios, as amostras foram digitalizadas. Nos ensaios preliminares as amostras foram inseridas no software “Corel Draw”. Com a imagem colocada no “Corel Draw”, pôde-se copiar o contorno das ranhuras feitas pelo jato de água, bem como medir a largura, a profundidade, a área e o perímetro das ranhuras. Os desenhos podem ser vistos no decorrer do próximo capítulo.

5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A gravação de um material requer uma estimativa preliminar da largura e da profundidade da ranhura que será aberta pelo jato abrasivo, ou melhor, a geometria de seu perfil. Estes dois parâmetros normalmente se alteram de acordo com três variáveis dos ensaios: a pressão d'água na bomba, a altura do bocal e a velocidade de translação do bocal (v).

Os dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia, de 0,3556 mm, comprimento do tubo de foco, de 100 mm, este com diâmetro interno de 0,762 mm. O abrasivo utilizado foi a granada 120#.

Três etapas foram realizadas, a saber: ensaios preliminares de ranhura única (1ª série e 2ª série), ensaios de ranhuras múltiplas (circulares ou por linhas paralelas) e ensaios finais para gravação de motivos ou desenhos.

Os ensaios preliminares de ranhura única visam verificar a largura, profundidade, área e perímetro da ranhura gerada, ou melhor, a seção transversal resultante.

Os ensaios de ranhuras múltiplas visam verificar o resultado conseguido sobre um baixo relevo gravado com linhas retas ou curvas, separadas entre si de determinados valores, para verificação do baixo relevo decorrente.

Após os ensaios de linhas múltiplas, foi possível projetar um desenho mais sofisticado para gravação em um ladrilho de vidro e outro de mármore.

A partir da experiência adquirida com todos os ensaios, foi possível fazer alguns ensaios adicionais para a gravação em placas de vidro e mármore.

5.1 Ensaios preliminares

5.1.1 Vidro Comum Plano - 1ª série

Para os ensaios preliminares no vidro comum plano, usaram-se dois prismas retangulares um medindo 100 mm x 155 mm x 20 mm e o outro 225 mm x 210 mm x 20 mm. Nos ensaios variou-se a velocidade, a altura do bocal com relação à placa de vidro e a pressão da bomba. Utilizou-se como abrasivo a granada de 120#.

A série de ensaios foi realizada com duas pressões de bomba (68 MPa e 138 MPa), três alturas de bocal (3 mm, 10 mm e 25 mm) e quatro velocidades do bocal (10, 25, 50 e 75 mm/s) totalizando 24 ranhuras abertas.

O ensaio com uma distância de 3 mm foi replicado nas duas pressões, o que gerou outras 8 ranhuras.

A seguir mostra-se as 32 ranhuras abertas no vidro com pressão de 68 MPa e 138 MPa, que foram escaneadas e seus perfis medidos através do “Corel Draw”. Foram feitas duas ranhuras na pressão de 68 MPa (Figuras 27 e 28) e duas ranhuras na pressão de 138 MPa (Figuras 29 e 30) com a mesma altura de bocal (3 mm) e com as quatro velocidades. Uma ranhura na pressão de 68 MPa (Figuras 31 e 32) e uma na pressão 138 MPa (Figuras 33 e 34) para altura de bocal de 10 mm e velocidades variadas. Para a altura de bocal de 25 mm foi feita uma ranhura na pressão 68 MPa (Figuras 35 e 36) e na pressão de 138 MPa (Figuras 37 e 38).

Vista Lateral

Vista Lateral

Vista Frontal

Vista Frontal

Velocidade do bocal**1) $v = 10 \text{ mm/s}$** **2) $v = 25 \text{ mm/s}$** **3) $v = 50 \text{ mm/s}$** **4) $v = 75 \text{ mm/s}$**

Figura 27 – Amostra 1 e Amostra 2 - Vista lateral e vista frontal das amostras com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Figura 28 – Amostra 1 e Amostra 2 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Velocidade do bocal

1) $v = 10 \text{ mm/s}$

2) $v = 25 \text{ mm/s}$

3) $v = 50 \text{ mm/s}$

4) $v = 75 \text{ mm/s}$

Figura 29 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Figura 30 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Velocidade do bocal

1) $v = 10 \text{ mm/s}$

2) $v = 25 \text{ mm/s}$

3) $v = 50 \text{ mm/s}$

4) $v = 75 \text{ mm/s}$

Figura 31 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Velocidade do bocal

1) $v = 10 \text{ mm/s}$

2) $v = 25 \text{ mm/s}$

3) $v = 50 \text{ mm/s}$

4) $v = 75 \text{ mm/s}$

Figura 32 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 68 MPa.

Vista Lateral

Vista Lateral

Vista Frontal

Vista Frontal

Velocidade do bocal**1) $v = 10 \text{ mm/s}$** **2) $v = 25 \text{ mm/s}$** **3) $v = 50 \text{ mm/s}$** **4) $v = 75 \text{ mm/s}$**

Figura 33 – Amostra 1 e Amostra 2 – Vista lateral e vista frontal das amostras com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 34 – Amostra 1 e Amostra 2 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Velocidade do bocal

1) $v = 10 \text{ mm/s}$

2) $v = 25 \text{ mm/s}$

3) $v = 50 \text{ mm/s}$

4) $v = 75 \text{ mm/s}$

Figura 35 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 36 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Velocidade do bocal

1) $v = 10 \text{ mm/s}$

2) $v = 25 \text{ mm/s}$

3) $v = 50 \text{ mm/s}$

4) $v = 75 \text{ mm/s}$

Figura 37 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 38 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 25 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Estes ensaios de ranhura única visam verificar a profundidade e a largura da ranhura gerada, assim como sua área resultante e o seu perímetro. Seus resultados podem ser observados nas Tabelas 1 a 8, a seguir:

Tabela 1 – Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 68 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	3,37	3,68	3,08	1,57
25	1,80	1,74	1,32	0,77
50	1,05	0,91	0,81	0,55
75	0,85	0,67	0,72	0,25

Tabela 2 – Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	10,26	10,40	7,73	5,08
25	4,66	4,88	3,96	3,23
50	2,71	2,44	2,17	2,10
75	1,91	1,81	1,85	1,61

Tabela 3 – Resultados da largura da ranhura (mm) à 68 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	1,99	2,11	3,48	2,79
25	1,99	1,75	2,31	2,02
50	1,64	1,61	2,16	1,66
75	1,64	1,52	1,77	1,60
Média		1,78	2,43	2,01

Tabela 4 – Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	1,83	2,27	2,66	3,54
25	1,66	2,04	2,01	3,56
50	1,73	1,81	2,03	3,32
75	1,57	1,96	1,94	3,26
Média		1,85	2,16	3,42

Tabela 5 – Resultados da área da ranhura (mm²) à 68 MPa feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	3,34	3,80	4,97	2,47
25	1,82	1,60	1,74	1,06
50	1,04	0,95	1,06	0,62
75	0,91	0,68	0,71	0,28

Tabela 6 – Resultados da área da ranhura (mm²) à 138 MPa feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	9,28	9,68	7,42	7,32
25	3,51	3,99	3,67	4,93
50	1,91	2,09	1,95	3,42
75	1,31	2,35	1,78	2,97

Tabela 7 – Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 68 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	9,48	10,23	11,10	7,12
25	6,40	5,84	5,96	4,70
50	4,36	4,18	4,99	3,75
75	4,10	3,65	4,12	3,31

Tabela 8 – Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)			
	3 (amostra 1)	3 (amostra 2)	10	25
10	23,08	23,79	18,87	14,95
25	11,87	12,44	10,39	11,31
50	7,42	7,26	7,02	8,85
75	5,85	6,96	6,27	7,98

5.1.2 Vidro Comum Plano - 2ª série

Esta 2ª série de ensaios foi feita após a atualização da máquina. Não foi possível efetuar-se ensaios com pressões inferiores a 138 MPa, pois o bocal entope com o abrasivo, e a máquina deixa de funcionar. Os ensaios preliminares no vidro foram elaborados em uma placa de 400 mm por 300 mm com espessura de 10 mm, com pressão de 138 MPa e variando-se a velocidade do bocal de 5,50 mm/s a 18,40 mm/s e a altura do bocal (3 mm, 10 mm e 20 mm).

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”¹, a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

A seguir mostra-se as 18 ranhuras abertas no vidro com pressão de 138 MPa, que foram escaneadas e seus perfis medidos através do “Corel Draw”. Com a altura do bocal ajustada em 3 mm, foram feitas duas ranhuras com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 39 e 40). Com a altura do bocal ajustada em 10 mm, foram feitas duas ranhuras com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 41 e 42). Com a altura do bocal ajustada em 20 mm, foram feitas duas ranhuras com com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 43 e 44).

¹ Parâmetros do equipamentos para a seleção do material a ser cortado.

Vista Lateral

Velocidade do bocal

V1 = 18,40 mm/s

V1 = 18,40 mm/s

V2 = 15,80 mm/s

V3 = 9,40 mm/s

V4 = 7,10 mm/s

V5 = 5,50 mm/s

Vista Frontal

Figura 39 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 40 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 41 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 42 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Velocidade do bocal

V1 = 18,40 mm/s

V1 = 18,40 mm/s

V2 = 15,80 mm/s

V3 = 9,40 mm/s

V4 = 7,10 mm/s

V5 = 5,50 mm/s

Figura 43 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 44 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Estes ensaios de ranhura única visavam verificar a profundidade e largura da ranhura gerada, assim como sua área resultante e o seu perímetro. Verifica-se nas Tabelas 9 a 12, a seguir.

Tabela 9 – Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	2,18	1,66	2,64
18,40	2,10	1,55	2,66
15,80	2,25	1,57	2,42
9,40	3,20	2,12	2,70
7,10	3,67	2,57	3,31
5,50	4,12	3,19	3,51

Tabela 10 – Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	1,05	1,95	2,66
18,40	1,11	1,80	2,39
15,80	1,07	2,05	2,75
9,40	1,27	2,10	3,17
7,10	1,34	2,18	3,64
5,50	1,12	2,32	3,83
Média	1,16	2,06	3,07

Tabela 11 – Resultados da área da ranhura (mm²) à 138 MPa
feitas no vidro comum

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	25
18,40	1,35	1,65	3,83
18,40	1,13	1,77	4,12
15,80	1,36	1,03	3,87
9,40	1,67	2,05	4,35
7,10	1,80	2,90	5,73
5,50	1,70	3,48	6,13

Tabela 12 – Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa
feitas no vidro comum.

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	25
18,40	5,66	5,44	8,27
18,40	5,49	5,86	8,64
15,80	5,84	4,48	8,49
9,40	7,90	6,76	9,68
7,10	8,84	8,11	11,60
5,50	9,07	9,20	12,54

5.1.3 Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim – 2ª série

Os ensaios preliminares no mármore foram elaborados em uma placa de 400 mm por 300 mm com espessura de 20 mm, com pressão de 138 MPa e variando-se velocidade do bocal de 5,50 mm/s a 18,40 mm/s e a altura do bocal (3 mm, 10 mm e 20 mm).

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “stone white marble”², a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

A seguir mostra-se as 18 ranhuras abertas no mármore com pressão de 138 MPa, que foram escaneadas e seus perfis medidos através do “Corel Draw”. Com a altura do bocal ajustada em 3 mm, foram feitas duas ranhuras com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 45 e 46). Com a altura do bocal ajustada em 10 mm, foram feitas duas ranhuras com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 47 e 48). Com a altura do bocal ajustada em 20 mm, foram feitas duas ranhuras com com velocidade do bocal de 18,40 mm/s e uma ranhura com as outras velocidades (Figuras 49 e 50).

2 Parâmetros do equipamentos para a seleção do material a ser cortado.

Vista Lateral

Velocidade do bocal

V1 = 18,40 mm/s

V1 = 18,40 mm/s

V2 = 15,80 mm/s

V3 = 9,40 mm/s

V4 = 7,10 mm/s

V5 = 5,50 mm/s

Vista Frontal

Figura 45 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 46 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 3 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa

Vista Lateral

Velocidade do bocal

V1 = 18,40 mm/s

V1 = 18,40 mm/s

V2 = 15,80 mm/s

V3 = 9,40 mm/s

V4 = 7,10 mm/s

V5 = 5,50 mm/s

Vista Frontal

Figura 47 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 48 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 10 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Vista Lateral

Velocidade do bocal

V1 = 18,40 mm/s

V1 = 18,40 mm/s

V2 = 15,80 mm/s

V3 = 9,40 mm/s

V4 = 7,10 mm/s

V5 = 5,50 mm/s

Vista Frontal

Figura 49 – Vista lateral e vista frontal da amostra com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Figura 50 – Corte transversal das ranhuras feitas com altura do bocal de 20 mm, velocidades variadas e pressão de 138 MPa.

Estes ensaios de ranhura única visam verificar a largura, a profundidade, a área resultante e o perímetro. Os resultados estão mostrados nas Tabelas 13 a 16, a seguir.

Tabela 13 – Resultados da profundidade da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	1,94	1,34	1,34
18,40	2,05	1,70	1,27
15,80	2,27	1,92	1,88
9,40	3,28	2,51	2,10
7,10	3,63	3,29	2,16
5,50	4,36	4,09	2,32

Tabela 14 – Resultados da largura da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	1,57	2,18	3,23
18,40	1,46	2,11	2,94
15,80	1,56	1,99	3,80
9,40	1,68	2,25	4,00
7,10	1,63	2,28	3,30
5,50	1,64	2,50	3,72
Média	1,16	2,22	3,50

Tabela 15 – Resultados da área da ranhura (mm²) à 138 MPa feitos no mármore.

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	1,41	1,39	1,83
18,40	1,34	1,61	1,62
15,80	1,50	1,73	3,12
9,40	2,18	2,43	3,26
7,10	2,55	2,99	2,93
5,50	2,96	4,11	3,15

Tabela 16 - Resultados do perímetro da ranhura (mm) à 138 MPa feitos no mármore.

Velocidade (mm/s)	Altura do bocal (mm)		
	3	10	20
18,40	5,91	5,79	7,75
18,40	5,94	6,26	7,10
15,80	6,48	6,49	9,50
9,40	8,68	7,97	10,33
7,10	9,25	9,54	9,16
5,50	10,77	11,36	10,16

A seguir observa-se uma comparação dos resultados obtidos com as três alturas do bocal (3, 10, 20 mm) e com a mesma velocidade, com pressão de 138 MPa feitas no vidro plano comum (Figuras 51, 53, 55, 57 e 59) e no mármore (Figuras 52, 54, 56, 58 e 60).

Figura 51 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3 , 10 e 20 mm com velocidade de 18,40 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 52 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3 , 10 e 20 mm com velocidade de 18,40 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 53 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 15,80 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 54 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 15,80 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 55 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 9,40 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 56 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 9,40 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 57 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 7,10 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 58 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 7,10 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 59 – Desenho comparativo das três gravações feitas no vidro comum com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 5,51 mm/s e pressão de 138 MPa.

Figura 60 – Desenho comparativo das três gravações feitas no mármore com altura do bocal de 3, 10 e 20 mm com velocidade de 5,50 mm/s e pressão de 138 MPa.

5.2 Ensaios posteriores

A seguir apresenta-se a segunda etapa, ou seja, os ensaios de ranhuras múltiplas. Na Figura 61 são mostrados os desenhos feitos no software da máquina. As linhas rosas indicam onde houve a gravação. As linhas verdes indicam o simples deslocamento do bocal. As linhas azuis indicam o tamanho dos desenhos. As linhas marrons indicam a divisão das três colunas.

Na Figura 62 há um detalhamento da gravação feita nas placas de vidro e de mármore. Esta operação foi realizada três vezes com diferentes parâmetros. Os números indicam a trajetória feita pela máquina. As linhas rosas indicam a gravação feita pela máquina. O bocal segue pelo segmento número 1 atingindo o número 2, onde são gravadas várias curvas com um espaçamento de 2 mm. Seguindo pelo número 3, começa uma nova gravação no número 4, gravando um vaivém com um espaçamento de 2,5 mm, terminando a gravação no número 5, que é apenas um deslocamento do bocal até o número 6. Inicia, então, uma nova gravação na linha rosa, com o mesmo espaçamento de 2,50 mm. Segue, assim, do número 7 para o número 8, que é apenas um deslocamento do bocal. No número 8, começa um novo vaivém com um espaçamento de 2,0 mm, terminando a gravação no número 9, que é apenas um deslocamento do bocal até o número 10. Neste ponto é feita uma gravação pelo método vaivém com um espaçamento de 2,0 mm até o segmento 11, onde há um pequeno deslocamento até o número 12. Neste, recomeça um vaivém com espaçamento de 1,5 mm. O número 13 é um deslocamento do bocal até o número 14, onde se começa outra gravação com um espaçamento de 1,5 mm terminando no número 15. Segue, assim, do número 15 para o número 16, que é apenas um deslocamento do bocal. Do número 16 até o número 20, tudo se repete (de acordo com os passos do número 4 até o número 8), com exceção do espaçamento, que é de 1,00 mm. O mesmo ocorre do número 20 ao número 24, onde o espaçamento agora é de 0,75 mm. O mesmo ocorre do número 24 ao número 28, onde o espaçamento agora é de 0,50 mm. No número 28 há uma gravação de um retângulo

Figura 61 – Desenho feito no AutoCAD da máquina de corte por jato de água.

Figura 62 – Detalhe do desenho feito no AutoCAD da máquina de corte por jato de água.

simples, onde faz um volta completa e pára de gravar no mesmo ponto que começou e segue para o número 29. Um deslocamento do bocal ocorre do número 29 até o número 30. Finalmente, realiza uma volta completa de gravação no círculo, saindo no mesmo ponto em que começou a gravação no número 31. Um deslocamento do bocal ocorre do número 31 até o final.

Na Figura 63, pode-se ver em detalhe os segmentos 1, 2, e 3, correspondentes ao espaçamento de 2 mm na letra A, e os segmentos 4, 5, 6 e 7 com um espaçamento de 2,5 mm na letra B.

Figura 63 – Detalhe da Figura 62, que corresponde à parte A com espaçamento de 2 mm, e parte B com espaçamento de 2,5 mm.

5.2.1 Vidro Plano Comum

Foi utilizada uma placa de vidro comum plano de 400 x 300 mm com espessura de 10 mm. Ela foi dividida em três colunas, e em cada uma delas foi utilizada a velocidade de 35,70 mm/s. Na primeira coluna foi utilizado um afastamento de bocal de 3 mm e uma pressão de 138 MPa; na segunda, um afastamento de bocal de 10 mm e uma pressão de 138 MPa e; na terceira, um afastamento de bocal de 3 mm e uma pressão de 172 MPa..

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

A Figura 64 mostra os resultados da coluna 1 dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 35,70 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 138 MPa, onde foram consumidos 1,37 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 6 minutos. O bocal percorreu 10.280 mm.

A Figura 65 mostra os resultados da coluna 2 dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 35,70 mm/s, um afastamento do bocal de 10 mm e pressão de 138 MPa, onde foram consumidos 1,37 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 6 minutos. O bocal percorreu 10.083 mm.

A Figura 66 mostra os resultados da coluna 3 dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 35,70 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. Após o primeiro círculo houve um entupimento do bocal, não se realizando o término do ensaio. A Figura 67 é detalhe da letra A da coluna 1 dos números 2 a 3.

Figura 64 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 1.

Figura 65 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 2.

Figura 66 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 3.

Figura 67 – Detalhe da gravação de ranhuras múltiplas – coluna 1, letra A.

5.2.2 Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim

Utilizou-se uma placa de mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim de 300 mm x 400 mm com uma espessura de 25 mm. A placa de mármore foi dividida em 3 colunas conforme descrito no item anterior. O desenho utilizado é o mesmo das Figuras 61 e 62, apenas os parâmetros utilizados foram diferentes. Na coluna 1 foi utilizada uma pressão de 138 MPa, afastamento de 3 mm e velocidade de bocal de 35,70 mm/s. Na coluna 2 foi utilizada uma pressão de 138 MPa, afastamento de 10 mm e velocidade de bocal de 35,70 mm/s. Na coluna 3 a pressão é a mesma, o afastamento é de 3 mm e a velocidade do bocal é de 25,00 mm/s.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “stone white marble”, a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

Figura 68 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 1.

Figura 69 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 2.

Figura 70 – Gravação de
ranhuras múltiplas
– coluna 3.

A Figura 68 mostra os resultados da coluna 1 dos ensaios executados no mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim com velocidade 35,70 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 138 MPa, onde foram consumidos 1,37 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 6 minutos. O bocal percorreu 10.083 mm.

A Figura 69 mostra os resultados da coluna 2 dos ensaios executados no mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim com velocidade 35,70 mm/, um afastamento do bocal de 10 mm e pressão de 138 MPa, onde foram consumidos 1,37 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 6 minutos. O bocal percorreu 10.280 mm.

A Figura 70 mostra os resultados da coluna 3 dos ensaios executados no Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim com velocidade 25,00 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 138 MPa, onde foram consumidos 1,73 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 8 minutos. O bocal percorreu 10.320 mm.

A Figura 71 é detalhe da Figura 68, mostrando a letra A da coluna 1 dos números 2 e 3.

Figura 71 – Detalhe da letra A da coluna 1 dos números 2 a 3 da Figura 68.

5.3 Ensaios da gravação final

Para a realização dos ensaios da gravação final, tanto no vidro como no mármore, foram feitas duas gravações. Na primeira, o desenho da figura é o mesmo para o mármore e vidro. A gravação consiste em ranhuras múltiplas, num vaivém como pode ser verificado na Figura 72. A Figura 73 é um detalhe do cabelo feito em ranhuras múltiplas com uma distância de 2 mm. A Figura 74 é detalhe dos círculos feito também com ranhuras multiplas mas com uma distância de 0,5 mm.

Na segunda gravação há uma pequena diferença. No vidro o desenho consiste apenas numa única ranhura sem nenhuma parada do jato de água abrasivo (Figura 75). No mármore, o desenho também consiste numa ranhura única, mas o jato de água pára e reinicia, como pode ser observado na Figura 76. As linhas azuis indicam gravação e as linhas verde representam trechos onde o bocal apenas se deslocou.

Figura 72 – Desenho da primeira gravação feita no vidro e no mármore.

Figura 73 – Detalhe do desenho da primeira gravação da Figura 76.

Figura 74 – Detalhe do desenho da primeira gravação da Figura 76.

Figura 75 – Desenho da segunda gravação feita no mármore.

Figura 76 – Desenho da segunda gravação feita no vidro.

5.3.1 Vidro comum plano

Foi utilizada uma placa de vidro Comum Plano de 400 x 300 mm com espessura de 20 mm. A Figura 77 mostra os resultados dos ensaios finais executados no vidro comum plano com velocidade 73,10 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. No primeiro desenho foram consumidos 1,81 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 7 minutos. O bocal percorreu 7.079 mm. No segundo desenho foram consumidos 1,9 kg de granada, o tempo de execução foi de aproximadamente 9 min e o bocal percorreu 7.476 mm.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

Figura 77 – Gravação final feita no vidro.

5.3.2 *Mármore Branco de Cachoeiro de Itapemirim*

Utilizou-se uma placa de de Mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim de 300 mm x 400 mm com uma espessura de 25 mm. O desenho utilizado é o mesmo das Figuras 76 e 80. A Figura 78 mostra os resultados da gravação. No início da gravação houve uma obstrução do bocal, danificando a placa de mármore, a placa de mármore foi marcada com um lápis de cera vermelho apenas para uma melhor observação da gravação.

A Figura 79 mostra os resultados dos ensaios executados no mármore Branco Cachoeiro de Itapemirim com velocidade 73,10 mm/s, um afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. Na primeira gravação foram consumidos 1,22 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 6 minutos. O bocal percorreu 7.480 mm. Na segunda gravação foram consumidos 1,8 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 9 minutos. O bocal percorreu 7.081 mm A Figura 79 também foi marcada mas com um lápis grafite para uma melhor visualização da gravação.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “stone white marble”, a espessura do material (3 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

Figura 78 – Gravação final feita no mármore, com o entupimento do bocal.

Figura 79 – Gravação final feita no mármore.

5.4 Ensaios Adicionais

Com a experiência adquirida através da realização dos ensaios de gravação apresentados anteriormente, e com o objetivo de apresentar resultados de melhor qualidade estética, decidiu-se por realizar uma série de ensaios adicionais, variando-se parâmetros relacionados ao abrasivo, à espessura do material ensaiado e, também, à complexidade geométrica do desenho.

Inicialmente foram alterados os parâmetros referentes ao abrasivo, pois a obstrução do bocal pode ter sido originada devido ao excesso de abrasivo. No equipamento, o fluxo de abrasivo é controlado fazendo o pó abrasivo passar através de um orifício; quanto menor este orifício, menor será o fluxo. Substituímos, temporariamente, a peça original do equipamento (orifício de 5 mm de diâmetro) por uma outra com diâmetro do orifício de 2,5 mm. Tal peça de reposição foi elaborada no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP. Devido a esta substituição, a taxa de fluxo de abrasivo, originalmente de 345,40 g/min, diminuiu para 157,90 g/min.

Na Figura 80 observa-se o desenho feito em AutoCAD. A Figura 81 mostra os resultados da gravação do teste com uma pressão de 138 MPa, velocidade de bocal de 40 mm/s e um afastamento de 3 mm, onde foram consumidos 3,10 kg de granada. O tempo de execução foi de 19,4 minutos. O bocal percorreu 24.471,45 mm. Na Figura 82 pode-se observar um detalhe da Figura 81, mostrando a gravação de ranhuras múltiplas com fluxo de abrasivo menor.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 120#.

Figura 80 – Desenho feito em AutoCAD.

Figura 81 – Gravação de ranhuras multiplas com fluxo de abrasivo menor.

Figura 82 – Detalhe da Figura 81, mostrando a gravação de ranhuras multiplas com fluxo de abrasivo menor.

Na Figura 83 observa-se um desenho do corte transversal da ranhura, vista lateral e vista frontal da amostra cortada com altura do bocal de 3 mm, velocidade de 40,00 mm/s e pressão de 138 MPa.

Vista Lateral

Vista Frontal

Figura 83 – Desenho do corte transversal da ranhura, vista lateral e vista frontal da amostra (altura do bocal de 3 mm, velocidade de 40 mm/s e pressão de 138 MPa).

O próximo ensaio foi realizado utilizando-se um abrasivo mais fino, granada 200#. O desenho utilizado para a gravação é o mesmo da Figura 61.

Foi utilizada uma placa de vidro comum plano de 400 x 300 mm com espessura de 10 mm. Ela foi dividida em três colunas, e em todas elas foi utilizada a velocidade de bocal de 71,50 mm/s, um afastamento de bocal de 3 mm e uma pressão de 138 MPa. Foi consumido 1,87 kg de granada. O tempo de execução foi de aproximadamente 10 minutos. O bocal percorreu 10.181 mm. Na primeira coluna ocorreu um entupimento do bocal interrompendo o ensaio. Foi refeito nas outras duas colunas.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm).

A Figura 84 mostra os resultados do ensaio realizado no vidro comum plano com o abrasivo mais fino.

Figura 84 – Gravação realizada com abrasivo mais fino.

Foi utilizada uma placa de vidro Comum Plano de 400 x 300 mm com espessura de 10 mm. Os desenhos utilizados são os mesmos das Figuras 72 e 75.

Os ensaios realizados tiveram de ser interrompidos. O ensaio da Figura 85 foi interrompido pela entupimento do bocal e o aparecimento de trincas. No ensaio da Figura 86 ocorreu um erro de ensaio, onde as linhas gravadas deviam ser apenas percorridas pelo bocal.

Na tentativa de evitar a quebra do material pelo abrasivo, colou-se uma camada de folha adesiva sobre a superfície da placa.

A Figura 87 mostra os resultados dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 73,10 mm/s, afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. Para a realização do primeiro desenho foi consumido 1,22 kg de granada de granulometria 200#. O tempo de execução foi de aproximadamente 7 minutos. O bocal percorreu 9.915 mm. Para o segundo desenho foi consumido 1,13 kg de granada, o tempo de execução foi de aproximadamente 5 minutos e o bocal percorreu 4.626 mm. A Figura 88 mostra algumas partes da amostra ensaiada.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi granada 200#.

Figura 85 – Ensaio interrompido pela entupimento do bocal e o aparecimento de trincas.

Figura 86 – Ensaio onde ocorreu um erro de gravação.

Figura 87 – Gravação realizada com abrasivo mais fino e com uma camada de folha adesiva.

Figura 88 – Pedacos de vidro que se quebraram durante o ensaio.

Foi utilizada uma placa de vidro Comum Plano de 400 x 300 mm com espessura de 10 mm. Os desenhos utilizados são os mesmos da Figura 72 e 75.

Todos os ensaios realizados até o momento foram executados com qualidade “etching”, onde o material não é cortado, apenas gravado. No ensaio relatado a seguir, utilizou-se a qualidade de corte e declara-se a espessura do material a ser cortado como 1 mm, apesar do material ter 10 mm, pois nosso objetivo não era cortar, apenas gravar.

A Figura 89 mostra os resultados dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 58,10 mm/s, afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. Para a realização do primeiro desenho foram consumidos 2,13 kg de granada de granulometria 200#. O tempo de execução foi de aproximadamente 12 minutos. O bocal percorreu 9.799 mm. Para o segundo desenho foi consumido 1,16 kg de granada, o tempo de execução foi de aproximadamente 8 minutos e o bocal percorreu 4.626 mm.

Figura 89 – Gravação feito com abrasivo mais fino com qualidade de corte.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic” (declarado como se possuísse espessura de 1 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm). O abrasivo utilizado foi a granada 200#.

Para o próximo ensaio utilizou-se um vidro mais espesso (20 mm). A Figura 90 mostra os resultados dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade de bocal de 83,60 mm/s, afastamento de 3 mm e pressão de 172 MPa. Para a realização do desenho foi consumido 1,4 kg de granada de granulometria 200#. O tempo de execução foi de aproximadamente 8 minutos. O bocal percorreu 9.799 mm.

Figura 90 – Gravação executada com abrasivo mais fino e com vidro de 20 mm de espessura.

Figura 91– Gravação executada com abrasivo mais fino e vidro de 20 mm de espessura, mostrando o outro lado do vidro.

Nos ensaios seguintes usa-se um desenho simplificado da minerva, como pode-se ver na Figura 92. O desenho final foi resultado da união de três desenhos, tendo a máquina duas paradas, não sendo, portanto, um jato contínuo.

A Figura 93 mostra os resultados dos ensaios executados no vidro comum plano com velocidade 83,60 mm/s, afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa. Foi consumido 0,7 kg de granada de granulometria 120#. O vidro utilizado no ensaio tem espessura de 10 mm. O tempo de execução foi de aproximadamente 2 minutos. O bocal percorreu 0,659 mm. Na Figura 94 pode-se observar o vidro visto pelo outro lado; como se trata de um material transparente, pode-se ver o aspecto de seu outro lado. A Figura 95 mostra o resultado do ensaio realizado com os mesmos parâmetros, mas com abrasivo de granulometria 200#.

Os demais dados para a realização dos ensaios são parâmetros do equipamento, como o diâmetro do orifício ou joia (0,3556 mm), o material “glass generic”, a espessura do material (1 mm), o comprimento do tubo de foco (100 mm) e o diâmetro interno do mesmo (0,762 mm).

Na Figura 96, os parâmetros são os mesmos das Figuras 93 e 95, a saber: velocidade de 83,60 mm/s, afastamento do bocal de 3 mm e pressão de 172 MPa, diâmetro do orifício ou joia de 0,3556 mm, material “white marble”, espessura declarada do material (1 mm), comprimento do tubo de foco (100 mm) e diâmetro interno do mesmo (0,762 mm).

Figura 92– Desenho simplificado utilizado para a gravação nas Figura 92, 93 e 95.

Figura 93 – Gravação executada com desenho simplificado em vidro de 10 mm de espessura e abrasivo 120#.

Figura 94 – A mesma gravação vista pelo outro lado com desenho simplificado em vidro de 10 mm de espessura.

Figura 95 – Gravação executada com um desenho simplificado com vidro de 10 mm de espessura e abrasivo 200 #.

Figura 96 – Gravação executada com um desenho simplificado com mármore de 10 mm de espessura e abrasivo 120 #

6. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Nota-se nas Tabelas 1, 2, 9 e 13 que a profundidade da ranhura é inversamente proporcional a velocidade, ou seja, quanto menor a velocidade maior será a profundidade, pois o jato de água abrasivo permanece mais tempo no mesmo local e, dessa maneira, remove mais material. Como exemplo disso pode-se ver na Tabela 9 que, com uma altura de bocal de 3 mm e uma velocidade de 18,40 mm/s, a profundidade da ranhura é de, aproximadamente, 2,18 mm; com a mesma altura do bocal e trabalhando com uma velocidade de 5,50 mm/s, a profundidade da ranhura é de 4,12 mm. Estes valores se referem ao vidro. No caso do mármore, como pode-se ver na Tabela 13, com uma altura do bocal de 3 mm e velocidade de 18,40 mm/s, a profundidade é de aproximadamente 2 mm, enquanto com a mesma altura do bocal e velocidade de 5,50 mm/s, a profundidade é de 5,50 mm.

Nas Tabelas 3, 4, 10 e 14 pode-se perceber que a largura é diretamente proporcional à altura do bocal, ou seja, quanto maior a altura do bocal, maior será a largura da ranhura. Como exemplo cita-se a altura do bocal de 3 mm, a largura média da ranhura, como pode ser visto na Tabela 10, é de 1,16 mm para o vidro; 1,16 mm para o mármore (Tabela 14). Altura do bocal de 10 mm, a largura média da ranhura é de 2,06 mm no vidro e de 2,22 mm no mármore. Altura do bocal de 20 mm, a largura média aumenta para 3,07 mm no vidro e no mármore aumenta para 3,50 mm.

Pelas figuras 40 (vidro) e 46 (mármore) pode-se notar que, quanto menor a altura do bocal, a energia do jato de água parece ser distribuída uniformemente ao longo de todo o feixe d'água incidente, tendo por resultado a escavação de uma ranhura que tem a forma da letra U. Pelas figuras 44 (vidro) e 50 (mármore) verifica-se que quanto maior a altura do bocal, este distribui a energia cinética do jato abrasivo com mais intensidade

na parte central que em suas periferias, resultando numa ranhura que terá a forma da letra V.

Nas figuras 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59 e 60, onde ilustra-se desenhos comparativos das três gravações com a mesma velocidade, pode-se perceber a relação tanto da profundidade com a velocidade, como da largura com a altura do bocal e também do formato da ranhura. Como exemplo pode-se citar as figuras 51 (vidro) e 52 (mámore) onde a velocidade empregada é de 18,40 mm/s e um altura de bocal de 3 mm; nota-se que as ranhuras formadas são totalmente diferentes no seu formato: enquanto que no vidro a ranhura é mais profunda (2,18 mm) e menos larga (1,05 mm), no mármore a profundidade é de 2,05 mm e a sua largura é de 1,46 mm. Assim, pela Tabela 17 pode-se sugerir um padrão quanto à profundidade e à largura que se quer usar.

Tabela 17 - Parâmetros para gravação

material usado	altura do bocal (mm)	velocidade usada (mm/s)	largura (mm)	profundidade (mm)
vidro	3	18,40	1,05	2,10
mámore	3	18,40	1,46	2,05
vidro	10	18,40	1,90	1,66
mámore	10	18,40	2,18	1,70
vidro	20	18,40	2,66	2,66
mámore	20	18,40	3,23	1,34
vidro	3	15,80	1,07	2,25
mámore	3	15,80	1,56	2,27
vidro	10	15,80	2,05	1,57
mámore	10	15,80	1,99	1,93

material usado	altura do bocal (mm)	velocidade usada (mm/s)	largura (mm)	profundidade (mm)
vidro	20	15,80	2,42	2,75
mámore	20	15,80	3,80	1,88
vidro	3	9,40	1,27	3,17
mámore	3	9,40	1,68	3,28
vidro	10	9,40	2,10	2,12
mámore	10	9,40	2,25	2,51
vidro	20	9,40	2,70	3,17
mámore	20	9,40	4,00	2,10
vidro	3	7,10	1,34	3,64
mámore	3	7,10	1,63	3,63
vidro	10	7,10	2,18	2,57
mámore	10	7,10	2,29	3,29
vidro	20	7,10	3,31	3,67
mámore	20	7,10	3,30	2,16
vidro	3	5,50	1,12	4,12
mámore	3	5,50	1,64	4,36
vidro	10	5,50	2,32	3,19
mámore	10	5,50	2,50	4,08
vidro	20	5,50	3,51	3,83
mámore	20	5,50	3,72	2,32

Nos ensaio de ranhuras múltiplas percebe-se que, quando o espaçamento da ranhura é muito pequeno (0,50 mm), o resultado, tanto no vidro (Figuras 64 e 66) como no mármore (Figuras 68, 69 e 70), é extremamente rugoso. Quanto maior o espaçamento, mais definida fica a ranhura.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste último item aborda-se uma descrição mais pormenorizada dos resultados dos ensaios realizados para então destacar as conclusões dos estudos.

Nos ensaios preliminares pode-se perceber que o perfil da ranhura pode variar. Ele pode ser definido como a seção transversal da área aberta pela energia cinética contida na lama abrasiva do jato d'água. Tem uma dimensão que é função da profundidade e da largura do sulco. Depois das pesquisas de gravação das rochas, e com cuidadoso exame dos perfis resultantes, que são a consequência da erosão promovida pelos jatos d'água abrasivos designados pela sigla AWJ, dois casos ideais extremos podem ser anotados, uma da energia elevada e outro da energia baixa.

No primeiro exemplo ideal, da energia elevada, a velocidade e a altura do bocal são baixas. Neste caso, a energia parece ser distribuída uniformemente ao longo de todo o feixe d'água incidente, tendo por resultado a escavação de uma ranhura que tem a forma da letra U. Neste caso da energia elevada, o jato trabalha como um grande formão plano para abrir a ranhura.

O segundo exemplo, da energia baixa, é caracterizado pela distribuição da energia cinética do jato abrasivo com mais intensidade na parte central que em suas periferias. A altura do bocal e a velocidade transversal do bocal são mais elevadas. Neste caso o perfil resultante da ranhura terá a forma da letra V. O efeito resultante neste caso é aquele de uma ferramenta mais afiada atuante num ponto como uma cunha.

Após as melhorias realizadas no equipamento, como atualização de software e aumento da potência da bomba hidráulica, além de outras, pode-se observar vantagens e desvantagens com relação à qualidade da gravação obtida.

As vantagens são:

- 1) O afastamento entre o bocal e a peça alvo pode ser precisamente ajustado em milímetros por definição do usuário;
- 2) A pressão da bomba é bem controlada e o defeito que ocorria anteriormente, como pôde ser visto na 1ª séries de ensaios preliminares, desapareceu por completo (Figuras 27, 29 e 31)

A atualização também trouxe desvantagens:

- 1) O sistema antigo podia trabalhar em qualquer pressão de bomba, a partir de 6,90 MPa até o montante máximo dado pela bomba, sendo o ajuste realizado por meio de uma válvula de alívio. No novo sistema não é permitido que a bomba trabalhe em pressões inferiores a 120 MPa;
- 2) Há um atraso na resposta do sistema quando se inicia a gravação. Com isso, no desenho CAD, o início não é gravado. Esta desvantagem não é tão problemática, uma vez que ela pode ser corrigida no início de um longo desenho.

Percebe-se que o desenho não pode ser muito elaborado. O ensaio realizado da Figura 74 contém partes mais escuras, que são na realidade trincas devido ao fato da pressão ser muito alta e estas trincas fragilizaram o material, ocasionando sua quebra no transporte (Figura 97). Pode-se notar pela Figura 98, que é um detalhe da Figura 74, a falta de um pedaço, além das trincas. Quando se realizam os ensaios com uma pressão mais baixa, não houve trincas. No mármore não ocorreu trincas, apenas o aprofundamento da ranhura, como pode-se ver na Figura 99, onde as partes mais escuras das linhas indicam que houve um leve entupimento do bocal; quando este desentupiu sozinho, houve um aumento da concentração do abrasivo e este causou um aprofundamento das ranhuras. O entupimento do bocal é algo que ocorre aleatoriamente, não podendo ser controlado.

A dureza do material deve ser levada em conta na formação das trincas, pois o vidro está situado entre 5,5 e 6 na escala Mohs¹, enquanto o mármore possui dureza entre 3 e 5; sendo o vidro um material mais duro, trinca-se mais facilmente.

¹ Escala Mohs é uma escala relativa de dureza desenvolvida em 1812 pelo mineralogista alemão Frederich Mohs (1773-1839). Este selecionou dez minerais considerados por ele os mais comuns. Não é uma escala linear, na medida que as diferenças de dureza entre os minerais contíguos não se mantêm constante. No entanto, pela facilidade de uso é, até hoje, de uso rotineiro em Mineralogia.

Figura 97 – Parte quebrada no transporte (detalhe da Figura 74).

Figura 98 – Uma parte da gravação feita da Figura 74, onde são mostradas as trincas e a falta de um pedaço.

Figura 99 – Uma parte da gravação (detalhe da Figura 77) onde podemos ver o aprofundamento das ranhuras.

Com desenho menos complicado, como o das Figuras 93 (vidro) e 96 (mármore), notaram-se dois problemas diferentes. No vidro verificou-se que ocorrem trincas. Estas podem ser vistas na Figura 94, que é o lado inverso do vidro, uma vez que ele é transparente. No mármore, se ocorre este problema, não se sabe, pois ele é um material opaco. Também percebe-se que o bocal tem que ter uma distância mínima para percorrer, para que haja, deste modo, uma gravação. No mármore e no vidro houve uma falha na gravação do olho; a ranhura foi gravada com pouca profundidade, pois o tempo em que o jato d'água ficou ligado foi muito pouco para conseguir equilibrar a pressão e assim haver uma gravação de fato. Na Figura 100 pode-se ver um detalhe do olho no vidro, na superfície em que houve a gravação. A Figura 101 mostra o mesmo detalhe invertido, ou melhor, visto pelo lado onde não houve a gravação; nota-se que a gravação foi feita muito de leve, pois quando há gravação de fato as linhas são bem escuras. No mármore aconteceu o mesmo problema, conforme mostra a Figura 102.

Figura 100 – Detalhe do olho da Figura 93

Figura 101 – Detalhe do olho da Figura 94

Figura 102 – Detalhe do olho da Figura 96

Outro parâmetro que se alterou foi o abrasivo. Fizeram-se vários testes com um abrasivo mais fino (200#) e nota-se que o bocal não entupiu nos testes realizados. Os resultados podem ser visto nas Figuras 87, 89, 91 e 95. Mas notou-se o aparecimento excessivo de trincas, e isto pode ser muito bem visto na Figura 95 se é comparada com a Figura 94. Na Figura 103 mostra-se um detalhe da comparação das duas gravações.

ABRASIVO 120#

ABRASIVO 200#

Figura 103 – Comparação das gravações feitas com dois tipos de abrasivo.

Utilizou-se um vidro mais grosso (20 mm), o dobro da maioria dos ensaios, com o intuito de se evitar as trincas; mas, como pode-se ver na Figura 91, o vidro se estilhaçou completamente. Conclui-se, deste modo, que a espessura do material não é tão relevante.

Outra tentativa para se evitar as trincas foi a colocação de uma folha adesiva por cima do material a ser gravado, conforme pode-se ver na Figura 87; mas isto também não ajudou, além de atrapalhar o deslocamento do bocal que se prendia nas parte já cortadas da folha adesiva.

Uma última tentativa de ensaio foi simular o corte de um material de 1 mm de espessura, ou seja, alimentar o software do equipamento com uma informação errônea sobre o material alvo, fazendo com que o equipamento gravasse (e não cortasse) o

material. Mesmo assim, a força do impacto do jato no vidro foi muito grande, estilhaçando-o, como pode ser visto na Figura 89.

Tentou-se alterar vários parâmetros para se chegar a algum resultado satisfatório, e percebeu-se que o melhor ensaio foi o com o abrasivo mais usado na máquina (120#), com um desenho relativamente simples e o bocal percorrendo uma distância mínima para gravar.

Como arquiteta de formação, e tendo procurado usar um avançado sistema de jato abrasivo para a realização de gravação em dois importantes materiais de construção civil, como chapas de rochas ornamentais e vidros, largamente empregados nos edifícios mais modernos, a autora está convencida que desponta uma nova técnica artística, que é a pintura em vidro ou rocha.

Acredita-se que as dificuldades acima relatadas, ocorridas durante a realização dos ensaios, possam ser contornadas e até certo ponto evitadas, fazendo com que este novo ramo da ciência e da técnica, que se denominou pintura em vidro, venha a ser uma alternativa de arte em futuro muito próximo.

No caso da pintura em vidro, chama-se atenção que, pela sua própria natureza de transparência, o vidro pode ser pintado ou gravado em ambas as faces, criando deste modo efeitos ambientais inéditos jamais vistos anteriormente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. São Paulo: 2007. **História completa do vidro**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/index.php/18>> Acesso em: 14 dez. 2008.

CARDOSO, J. O. C. Máquinas de corte. **Metallurgia & Materiais**, São Paulo, v. 60, p. 378-382, jul. 2004.

CARUSO, L. G. **Catálogo de rochas ornamentais**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL. **O vidro - Composição química**. São Paulo: 2007. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/Conteudo/Vidro03.asp>> Acesso em: 08 nov. 2008.

COMO funciona. In: Vitor Civita. **Enciclopédia de ciência e técnica**. São Paulo: Abril, 1979. v. 3, p. 486.

CUTLER, V. Cutting glass creatively with abrasive waterjet – an overview. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: Water Jet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom

FREIST, B. et al. Abrasive jet machining of ceramic products. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 5th, 1989, St. Louis. **Proceedings**. St. Louis: The Water Jet Technology Association, 1989. p. 191-204.

HASHISH, M. Milling with abrasive-waterjets: a preliminary investigation. In: U.S. WATER JET CONFERENCE, 4th, 1987, Berkeley. **Proceedings**. St. Louis: The Water Jet Technology Association /ASME, 1987. p. 1-10.

HASHISH, M. Turning, milling, and drilling with abrasive water jets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON JET CUTTING TECHNOLOGY, 9th, 1988, Cranfield. **Proceedings**. Cranfield: BHRA-Air Science Company, 1988. p. 113-131.

HASHISH, M. Controlled-depth milling techniques using abrasive-waterjets. In: ALLEN, N. G. (Ed). **Jet cutting technology: applications and opportunities**. Cranfield: BHR Publications, 1994a. p. 449-461.

HASHISH, M. Controlled-depth milling of isograd structures with abrasiv-waterjets. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 1994, Chicago. **Proceedings**. New York: ASME, 1994b. p. 413-419. (PED Series, v. 68-I)

HENNIES, W.T. et al. Otimização do corte de polipropileno com jato abrasivo. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 161-189, 2004.

HENNIES, W.T.; LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R. **Jato de água abrasivo para corte e gravação de materiais friáveis**. São Paulo: EPUSP, 2002. 18 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/157).

HOLMQVIST, G.; ÖJMERTZ, K. M. C. Process developments and apparatus for discretized abrasive waterjet milling. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9th, 1997, Dearborn, Michigan. **Proceedings**. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1997. v. 1, p. 77-91.

KLAVUHN, J. G.; BAKER, C. B. Industrial needs survey – waterjet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 5th, 1989, St. Louis. **Proceedings**. St. Louis: The Water Jet Technology Association, 1989. Paper 26.

LAUAND, C.T. **Contribuição ao estudo do corte de rochas por jato d'água abrasivo**. 2001. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LAUAND, C.T. **Corte de rochas por jato d'água abrasivo. 2005**. 94 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R.; HENNIES, W.T. Jato d'água abrasivo para corte de ladrilhos cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46., 2002, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira Cerâmica, 2002. 1 CD-ROM.

LAUAND, C.T. et al. The brazilian program of high pressure water jet to cut ornamental rocks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 6th, 2000, Calgary. **Proceedings**. Rotterdam: Balkema, 2000. p. 711-716.

LAUAND, C.T. et al. Performance of water jet cutting system in dimension stone. In: 2001 WJTA AMERICAN WATERJET CONFERENCE, 2001, Minneapolis. **Proceedings**. St. Louis: WJTA, 2001. p. 449-470.

LAURINAT, A.; LOUIS, H.; MEIER-WIECHERT, G. A model for milling with abrasive waterjet. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7th, 1993, Seattle. **Proceedings**. St. Louis: Water Jet Technology Association, 1993. p. 119-139.

MAIA, S. M. **O vidro e sua fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PILKINGTON NO BRASIL. **Nossa tecnologia e nossos processos**. 2009. Disponível em: <<http://www.pilkington.com/the+americas/brazil/portuguese/about+pilkington/this+is+pilkington/our+technology+and+processes/default.htm>> Acesso em: 07 fev. 2009.

REVISTA INFOROCHAS. **Serviço - Pólos**. 2009. Disponível em:
<<http://www.revistainforochas.com.br/item/item.php?id=27>> Acesso em: 05 jan. 2010.

SHIPWAY, P. H.; FOLKES, J. Mechanisms of coating removal with waterjets. In:
INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham.
Proceedings. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 193-202.

ZENG, J.; KIM, T. J. Machinability of engineering materials in abrasive water jet
machining. **International Journal of Water Jet Technology**, Gloucester, v. 2, n. 2, p.
103-110, 1995.

ZENG, J.; MUÑOZ, J. Milling ceramics with abrasive waterjets - an experimental
investigation. In: AMERICAN WATERJET CONFERENCE, 9th, 1997, Dearborn,
Michigan. **Proceedings**. Saint Louis: Waterjet Technology Association, 1997. v. 1, p.
93-107.

Referências Consultadas

ANJIAH, D.; CHINCHOLKAR, A. M. Cutting of glass using low pressure abrasive water suspension jet with the addition of zycoprint polymer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 105-120.

ANNONI, M.; MONNO, M. A repeatable set-up for water jet laser Doppler velocity measurements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 305-322.

ASATRYAN, J. A. The technology and the machine for cutting wall stone of the correct form by ultra-high pressure waterjets. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

BACH, Fr.-W. et al. Investigation of the AWIJ-drilling process in cortical bone. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

BISKUP, C.; SCHENK, A.; BACH, F-W. Cutting performance comparison of the AWIJ technique with intake of abrasive/air-mixture or suspension as well as the AWSJ. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 155-168.

BORKOWSK, P.; KOSZALIN, L. Application of high-pressure water jet for abyssal well renovation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 79-86.

BORKOWSKI, P. et al. The Basis of High Explosives Washing Out Technology from Heavy-Artillery Ammunition. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

CHILLMAN, A.; RAMULU, M.; HASHISH, M. Investigation of Surface Preparation in Superplastic Formed Metals. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

CICCU, R.; BORTOLUSSI, A.; CAREDDU, N. A new technology for the disposal of worn car tires. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 143-154.

CICCU, R.; MANCA, P.P. Energy requirements in modern stone quarries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION , 3RD, 1994, Perth.

Proceedings. Perth: The University, [1994]. p. 111-116.

CUI, L.; AN, L. Application of abrasive suspensions jet (ASJ) to cut bolts in underground coal mine. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston.

Proceedings. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

DOI, S. et al. Performance of water jet cutter for perforating and cutting construction material. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 95-104.

FOLKES, J.; SHIPWAY, P. H. Waterjet peening of titanium. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 229-238.

FOSSEY, R. D. Ductile iron pipe lining erosion characteristics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 183-192.

FOWLER, G.; SHIPWAY, P. H.; PASHBY, I. R. An investigation of the role of jet impingement angle on process efficiency and surface characteristics for abrasive waterjet milling of Ti6Al4V. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 353-364.

FRENZEL, L. What effect does waterjet cleaning have on the surface and surface preparation? In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston.

Proceedings. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

FU, S.; LI, H.; DUAN, X. Research on ultrafine comminution of minerals by thermally assisted high pressure water jet. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

GENT, M. et al. Orientative deformation mode cutting results of some alternative abrasives for applications in abrasive waterjet cutting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 289-304.

GRACEY, M.T. Beyond water jetting. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

GRYGLA, M. S.; TODD, R. H. An investigation of methods to homogeneously entrain and suspend abrasive particles in a low pressure dental water jet. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HAN, S. S.; KIM, J. G. Drilling and slotting of hard rock with abrasive suspension water jet. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HASHISH, M. Diamond film polishing with abrasive-liquid jets: an exploratory investigation. In: WINTER ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 1992, Anaheim. **Proceedings**. New York: ASME, 1992. p. 29-41. (PED Series, v. 58).

HASHISH, M. Deep hole drilling in metals using abrasive-waterjets. In: GEE, C. (Ed). **Jetting technology: applications and opportunities**. Cranfield: BHR Group Publications, 1996. p. 691-708.

HASHISH, M. Benefits of dynamic waterjet angle compensation. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HASHISH, M. Waterjet pocket milling of titanium aluminide. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 365-376.

HENNIES, W. T. et al. Cut and etch of stainless steel trophy by AWJ. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HENNIES, W. T.; TOMI, G. de. Oil extraction from shale by water jetting. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 169-182.

HENNIES, W.T.; STELLIN JÚNIOR, A.; CRETELLI, C. Jet piercing application for red granite block mining in São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 8th, 1999, Dnipropetrovsk. **Proceedings**. Dnipropetrovsk: National Mining University of Ukraine, 1999. p. 21-26.

HENNING, A.; LIU, H.-T. Economic efficiency and control of high power abrasive. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 251-260

HENNING, A.; WESTKÄMPER, E. Dynamic analysis of the spatial-temporal behaviour of the cutting front in abrasive waterjet cutting. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HLAVAC, L. M. et al. Quality evaluation of the AWJ cutting through the declination angle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 31-45

HLAVÁČ, L. M. System of chambers for activation of modulation or pulsation in water jets. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

HLAVACOVA, M. et al. Propagation of the abrasive water jet in free air and through material. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 21-30.

HOLMQVIST, G.; HONSBURG, U. Sensitivity analysis of abrasive waterjet cutting economy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 273-288.

LI, H-T. Evaluation of nozzle health states for AWJ machining. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 5-20.

IGNATIUK, T.; LINDE, M. Gaining access into a large vehicle bomb. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

INOUE, F. et al. Development of water jet cutter system for disaster relief. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 87-94.

JÄSCHKE, P. et al. Laser based pulsing of pure water jets. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

JIANG, S.; TAN, K. Automatic control of cutting speed for curvilinear cutting. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

KLUZ, K.; GESKIN, E.S.; PETRENKO, O. Numerical approximation of propellant driven water projectile launchers. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

LAUAND, C.T. et al. Uso de abrasivo artificial para corte de granitos. In: REUNIÃO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO IBERO-AMERICANA DE ENSINO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE MINAS, 12.; SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; WORKSHOP EM RISCOS GEODINÂMICOS, 1., São Paulo, 2004. **Trabalhos apresentados**. São Paulo: EPUSP, 2004. p. 61-66.

LAURINAT, A. Abtragen mit wasserabrasivinjektorstrahlen. **VDI-Fortschritt- Berischte**, Reihe 2, n. 327, p. 1- 167, 1995.

LIU, H.-T.;et al. Low-cost manufacturing of flow channels with multi-nozzle abrasive waterjets: a feasibility investigation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 337-352.

MACCARINI, G. et al. Characterization of the AWJ kerf: the influence of material properties. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 67-78.

MÁDR, V.; VILIAMSOVÁ, J.; HLAVÁČ, L. M. Analysis of flow inside the focusing tube of the abrasive water jet cutting head. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

MARTÍN CORTÉS, G.R. **Métodos de corte de rochas com jato de água abrasivo**. 2003. 132 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

;MILLER, D. S. From a single product (AWJ) to a multi product abrasive waterjet industry. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

MILLER, H. B.; WANG, F. D. The characterization of rock failure induced by high frequency modulated fluid jets in crystalline rock. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

MOMBER, A. **Waterjet applications in construction engineering**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1998.

MOMBER, A.W.; KOVACEVIC, R. **Principles of abrasive water jet machining**. Londres: Springer-Verlag, 1998.

NAKAYAMA, T. et al. Study of mold polishing by means of an abrasive water jet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham.

Proceedings. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 239-248.

NAMBIATH, P. et al. Parameter optimization in munitions cutting using abrasive waterjets.

In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St.

Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

NAMBIATH, P.; GALECKI, G.; SUMMERS, D. Optimizing focusing tube geometry using steel abrasive particles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING,

19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 47-54

NAMBIATH, P.; GALECKI, G.; SUMMERS, D.A. Energy based modelling of abrasive slurry jet. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston.

Proceedings. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

OIKE, M.; KOBAYASHI, R. Comparison between effects of water temperatura and

injection pressure on cavitating jet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER

JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings.** Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p.

261-272.

PEREC, A. The simulation model of high pressure, suspension waterjet cutting process with use of the artificial neural network. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO,

2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1

CD-Rom.

POWELL, M. Optimization of UHP waterjet cutting heads, the orifice. In: AMERICAN

WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis: WaterJet

Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SAMARDZIC, V. Innovative liquid impact based material micro forming technology. In:

AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis:

WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SAMARDZIC, V. Investigation of granite boring using high speed liquid projectiles. In:

AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis:

WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SAMARDZIC, V. Investigation of metal processing using a high speed liquid impact. In:

AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings.** St. Louis:

WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SHIMIZU, S. et al. High-speed observations of submerged water jets issuing from an abrasive water jet nozzle. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SHIMIZU, S.; SHINODA, Y.; PENG, G. Flow characteristics of water jet issuing from a fan jet nozzle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 55-66.

SIDDIQUI, T. U.; SHUKLA, M. Minimisation of surface roughness in abrasive waterjet cutting of transport aircraft glass fibre composite components. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 323-336.

SNIDER, D. 6 axis robotic abrasivejet advancements in accuracy for quality and production. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

SOYAMA, H. Release of micro strain in tool alloy steel by a cavitating jet in air. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 219-228.

TIEU, A.; YAN, W.; VIJAY, M. Considerations in the use of pulsed water jet techniques for the removal of HVOF coatings. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

TRIEB, F.; KARL, R.; MODERER, R. Pressure and flow rate fluctuations at high pressure intensifier pumps. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

VIJAY, M. Demonstration, validation and certification of forced pulsed waterjet technique for the removal of coatings from aircraft/aerospace components. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 19th, 2008, Nottingham. **Proceedings**. Cranfield: BHR Group Limited, 2008. p. 203-218.

WRIGHT, D.; WOLGAMOTT, J.; ZINK, G. A comparison of tube nozzle performance. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

WRIGHT, D.; WOLGAMOTT, J.; ZINK, G. Parameters affecting surface preparation. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

XUE, S. et al. Ultra high pressure waterjet rust removal line design and test. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

YAN, W. et al. Enhancing the performance of pulsed waterjets for various industrial applications. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

ZENG, J. Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

ZENG, J.; KIM, T.J. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. **Wear**, Amsterdam, n. 193, p. 207-217, 1996.

ZENG, J.; OLSEN, J. Impact of residual stresses on accuracy of AWJ cutting. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.

ZHANG, S. et al. Use of pre-profiling a milled pocket as a means of improving machining and lowering energy costs. In: AMERICAN WJTA CONFERENCE AND EXPO, 2007, Houston. **Proceedings**. St. Louis: WaterJet Technology Association, 2007. 1 CD-Rom.